



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 99-18

ОНФ

Н.К. Булгаков, А.П. Воробьев, В.Ф. Головкин, С.Н. Головня,  
А.Г. Холоденко, Ю.П. Цюпа, В.Б. Чмиль  
*Институт физики высоких энергий, Протвино*

Н.В. Баранова, А.Г. Воронин, Д.Е. Карманов,  
Е.Н. Кузнецов, М.М. Меркин  
*Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва*

**ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ  
НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ  
КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

Протвино 1999

### Аннотация

Булгаков Н.К. и др. Влияние охлаждения на радиационную стойкость кремниевых детекторов.: Препринт ИФВЭ 99-18. – Протвино, 1999. – 13 с., 15 рис., библиогр.: 3.

Приведены результаты изучения радиационной стойкости *Si*-структур для создания на их основе координатных детекторов. Облучение образцов проводилось на бустере ИФВЭ при различных температурах. Проведен анализ вольт-амперных характеристик образцов, облученных потоком протонов, на основе которого дается заключение об изменении электрофизических и структурных свойств тестовых образцов. Исследования радиационной стойкости показали, что образцы, облученные при температуре  $T = -19$  °С, более радиационно стойки, чем образцы, облученные при комнатной температуре.

### Abstract

Bulgakov N.K. et al. Radiation Test of Silicon Detectors at Different Temperatures.: IHEP Preprint 99-18. – Protvino, 1999. – p. 13, figs. 15, refs.: 3.

The results of the radiation stability study of *Si*-structures to construct on their base the coordinate detectors have been presented. The samples were irradiated at the IHEP booster under different temperature conditions. The analysis of volt-current characteristics of the samples irradiated by a flow of protons was made, and on this basis the conclusion was drawn on the change of electrophysical and structural characteristics of the test samples. The search for the radiation resistance showed that the samples irradiated at temperature  $T = -19$  °C were radiation harder than the samples irradiated at room temperature.

В работе исследовано влияние охлаждения на изменение характеристик кремниевых детекторов в результате облучения их протонным пучком.

Нами исследовались детекторы, являющиеся образцами-свидетелями микроstriповых детекторов, изготавливаемых ПО “ЭЛМА” (г. Москва). Образцы (диодные структуры  $p-n$ -типа) сформированы в виде ряда из пяти идентичных детекторов размером  $5,4 \times 5,4$  мм<sup>2</sup> каждый, объединенных общей подложкой толщиной 380 мкм. Подложка изготовлена из кремния  $n$ -типа с удельным сопротивлением 5 кОм·см [1].

Перед облучением каждая пятерка детекторов монтировалась на отдельную рамку. Там же, перед каждым из детекторов, для последующего мониторинга интегрального протонного потока были установлены алюминиевые фольги.

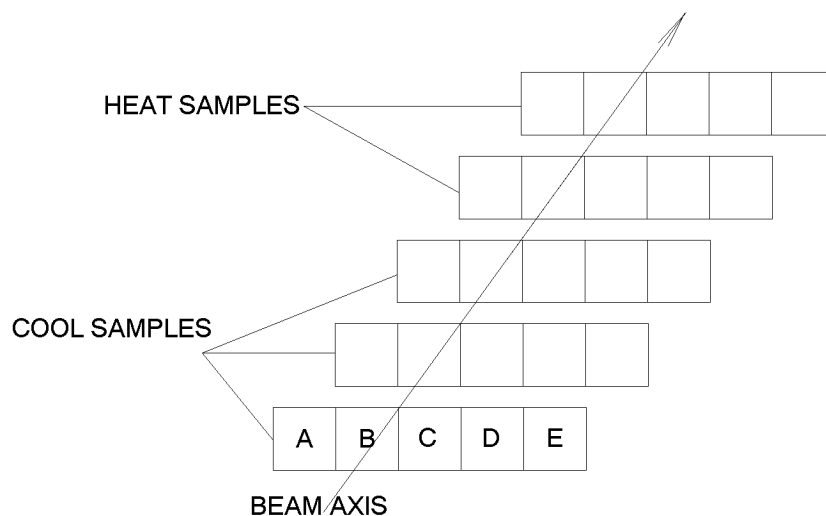


Рис. 1. Положение детекторов при облучении.

Рамки с детекторами размещались перпендикулярно оси пучка протонов. Схема размещения детекторов в ходе их экспонирования в пучке показана на рис.1.

Детекторы были разделены на две группы. Первая группа состояла из 10 детекторов, которые облучались при температуре 19 °С. Вторая, из 15 детекторов, устанавливалась в специальный, охлаждаемый газообразным азотом бокс и экспонировалась в пучке при температуре -19 °С. В дальнейшем, после облучения,

охлажденные детекторы постоянно хранились при температуре  $-10$  °С. Их характеристики измерялись при этой же температуре. В процессе облучения на все детекторы было подано напряжение смещения равное 30 В.

Облучение проводилось в пучке бустера ИФВЭ. Энергия протонов равнялась 1 ГэВ. Средний поток протонов через детекторы составлял  $5 \cdot 10^{13}$  прот./см<sup>2</sup> час. Интегральный поток протонов, прошедший через каждый из исследовавшихся детекторов, измерялся методом активационного анализа, по количеству изотопов  $^{22}\text{Na}$  и  $^{24}\text{Na}$ , образовавшихся в алюминиевых фольгах (см., например, [2]).

В процессе измерений детекторы характеризовались: поведением обратных ветвей вольт-амперной (ВАХ) и вольт-фарадной (С-V) зависимостей полупроводникового перехода, токами утечки, напряжениями полного обеднения, величиной отклика на альфа- и бета-частицы.

Непосредственно перед облучением детекторов в пучке были измерены их вольт-амперные характеристики. В ходе облучения детекторов пучком ВАХ не измерялись. Первые измерения были сделаны спустя сутки по окончании экспозиции. Соответствующее этим измерениям семейство ВАХ для “теплых” и “холодных” детекторов представлено на рис.2 и 3. Можно видеть, что абсолютная величина тока утечки в результате облучения значительно выросла у обеих групп детекторов, однако качественный вид зависимости во всем диапазоне изменения величины напряжения смещения практически сохранился.

Значение величины тока утечки для “теплых” детекторов примерно на порядок выше, чем у “холодных” детекторов.

Последующие измерения ВАХ были выполнены нами по истечении 10, 30 и 50 дней после облучения. С течением времени численное значение величины тока утечки уменьшается для обеих групп детекторов, качественный характер зависимости от напряжения смещения не меняется. На рис.4,5 приведены обратные ветви ВАХ, измеренные через 10 дней после облучения. Диапазон изменения величины напряжения смещения был  $0 \pm 300$  В (на рис. не показано).

На рис.6 приведена зависимость величины тока утечки от времени, прошедшего после облучения детекторов. Измерения выполнены при значении напряжения смещения равном 100 В. Из рисунка видно, что с течением времени величина тока утечки детектора стремится к постоянному значению.

Рис.7 иллюстрирует зависимость величины тока утечки детектора (значение напряжения смещения равно 100 В) от интегрального потока протонов, прошедших через данный детектор. Эта зависимость может быть описана линейной функцией вида:

$$I = V \cdot (\alpha_p \Phi_p), \quad (1)$$

где  $V$  — объем детектора (см<sup>3</sup>),  $\Phi_p$  — интегральный поток протонов, прошедших через детектор (прот./см<sup>2</sup>),  $\alpha_p$  — коэффициент радиационной деградации детектора. Значение  $\alpha_p$ , измеренное через 10 дней после облучения:  $\alpha_p = (0,86 \pm 0,23) \cdot 10^{-17}$  А/см для “холодных” образцов и  $\alpha_p = (6,52 \pm 1,54) \cdot 10^{-17}$  А/см для “теплых” образцов. Эти значения согласуются с данными, полученными в работах [1] и [3].

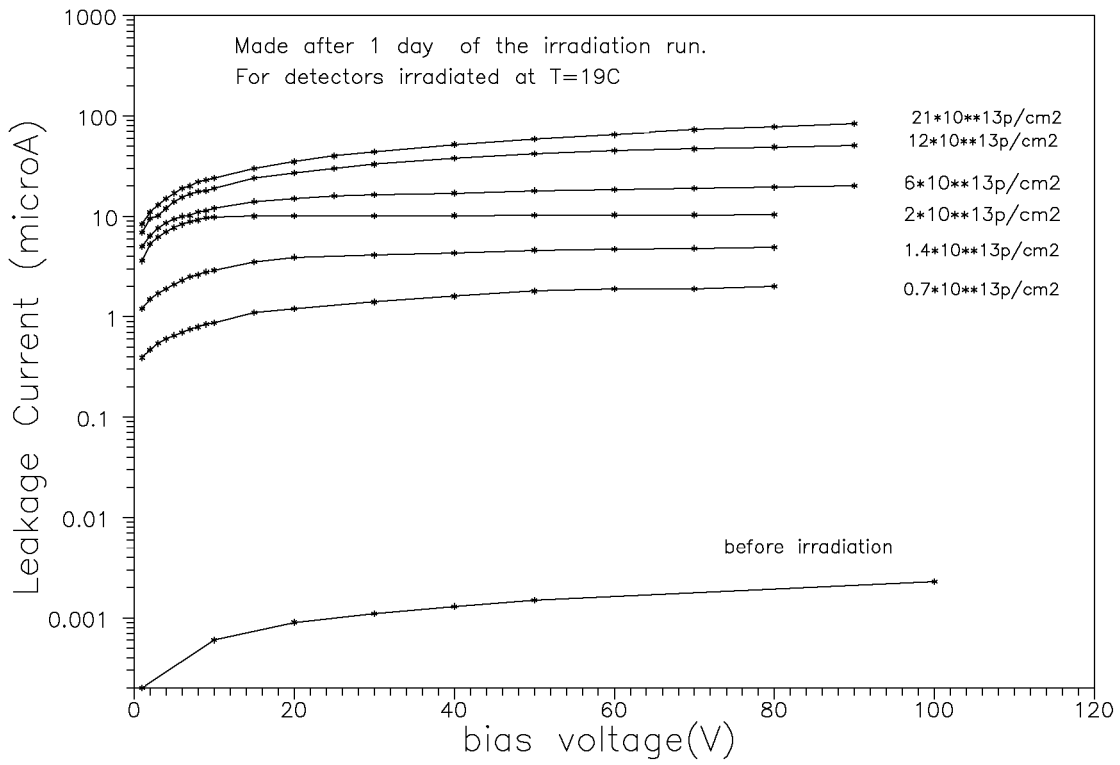


Рис. 2. Токи утечки неохлажденных детекторов.

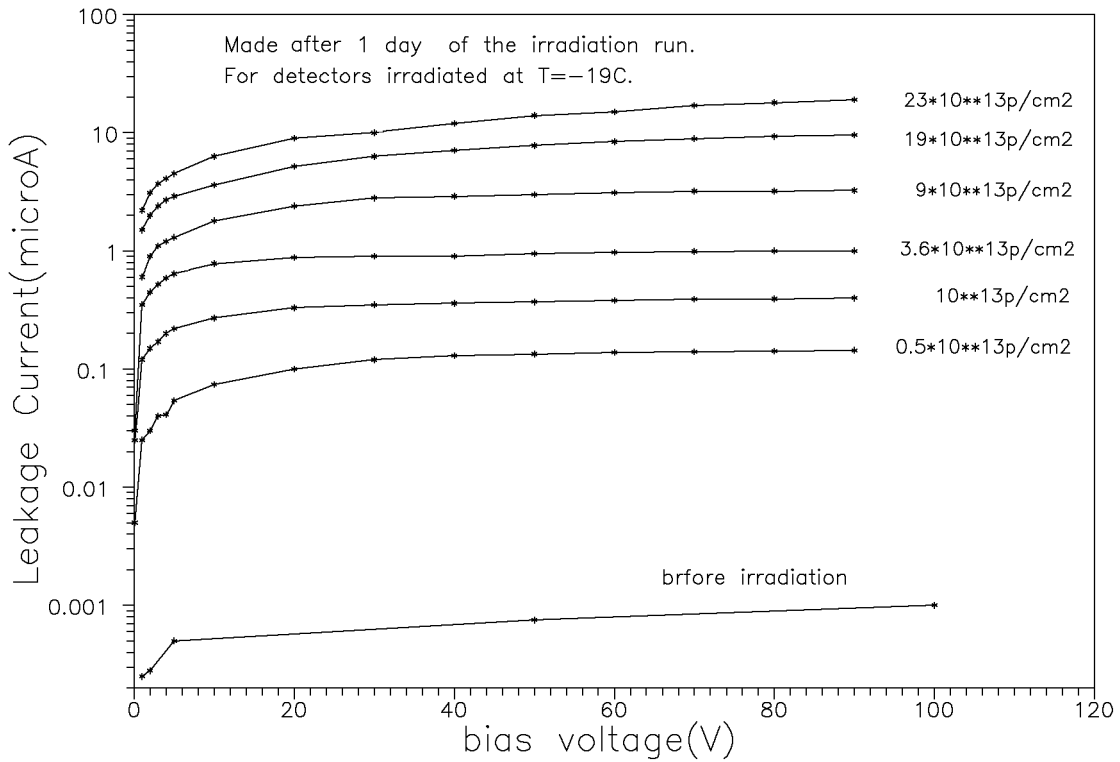


Рис. 3. Токи утечки охлажденных детекторов.

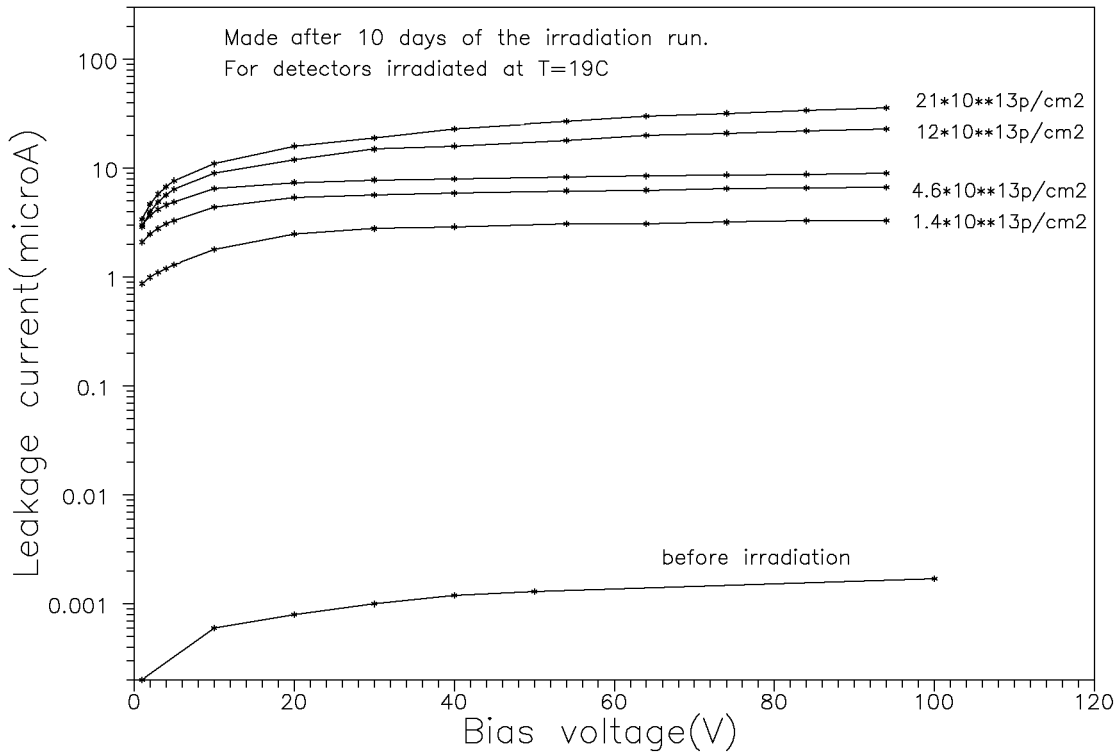


Рис. 4. Токи утечки неохлажденных детекторов.

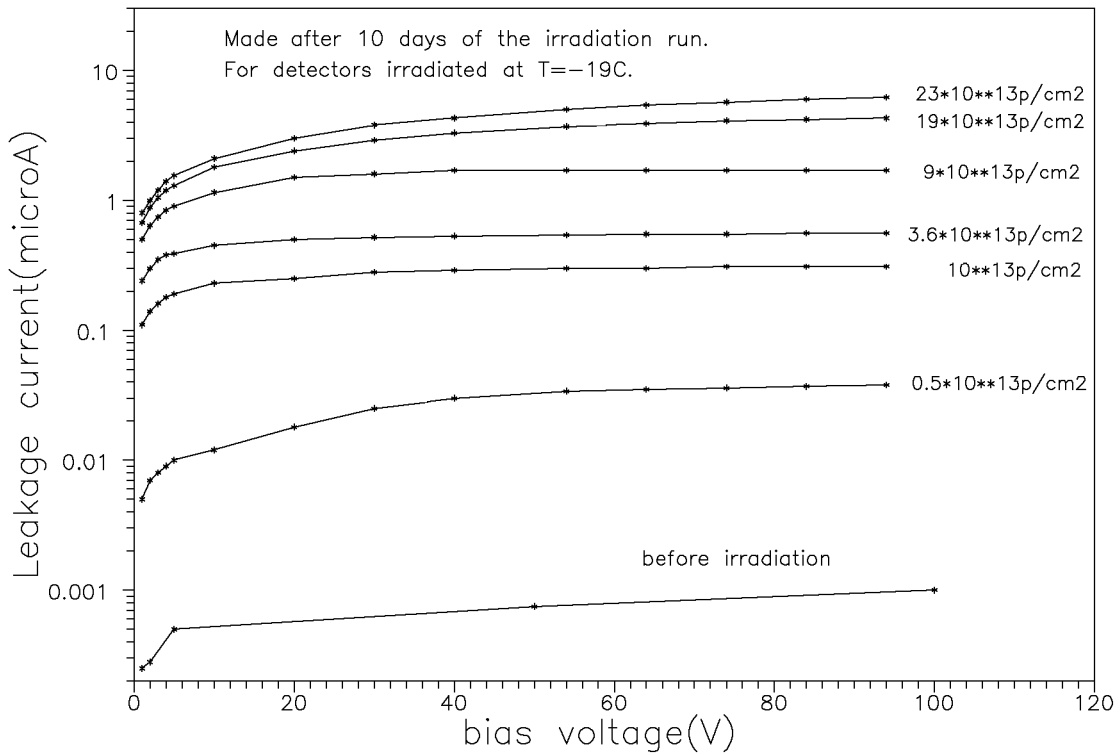


Рис. 5. Токи утечки охлажденных детекторов.

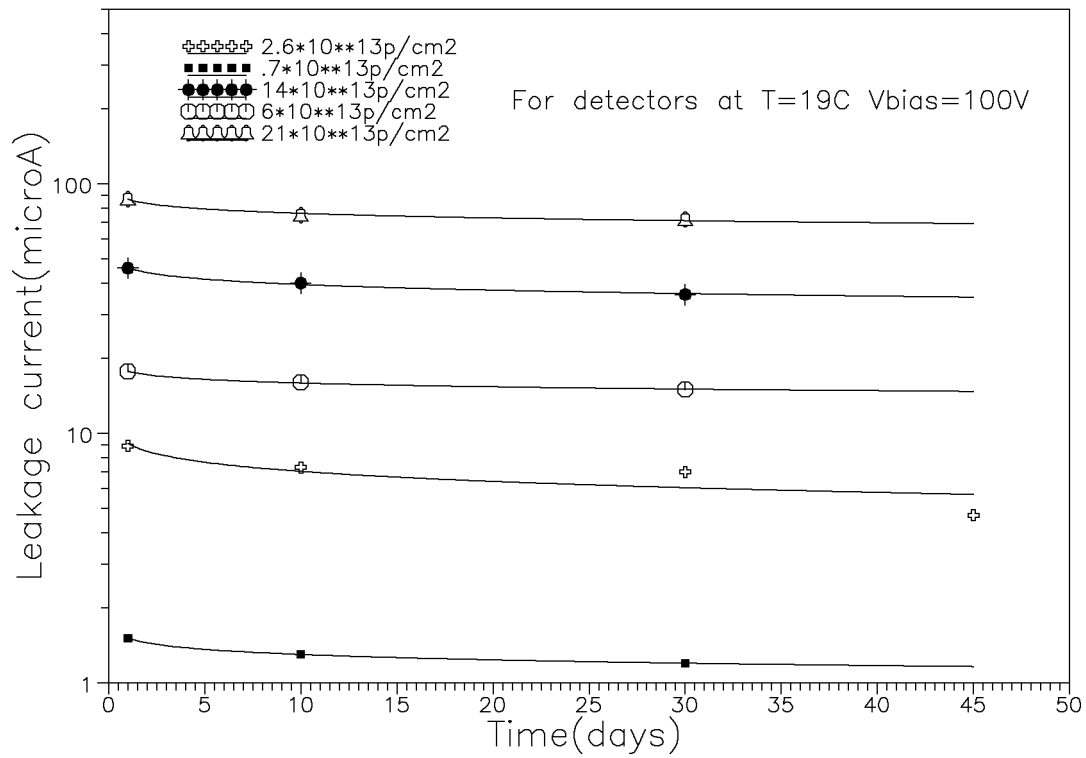


Рис. 6. Зависимость токов утечки от времени при напряжении 100 В.

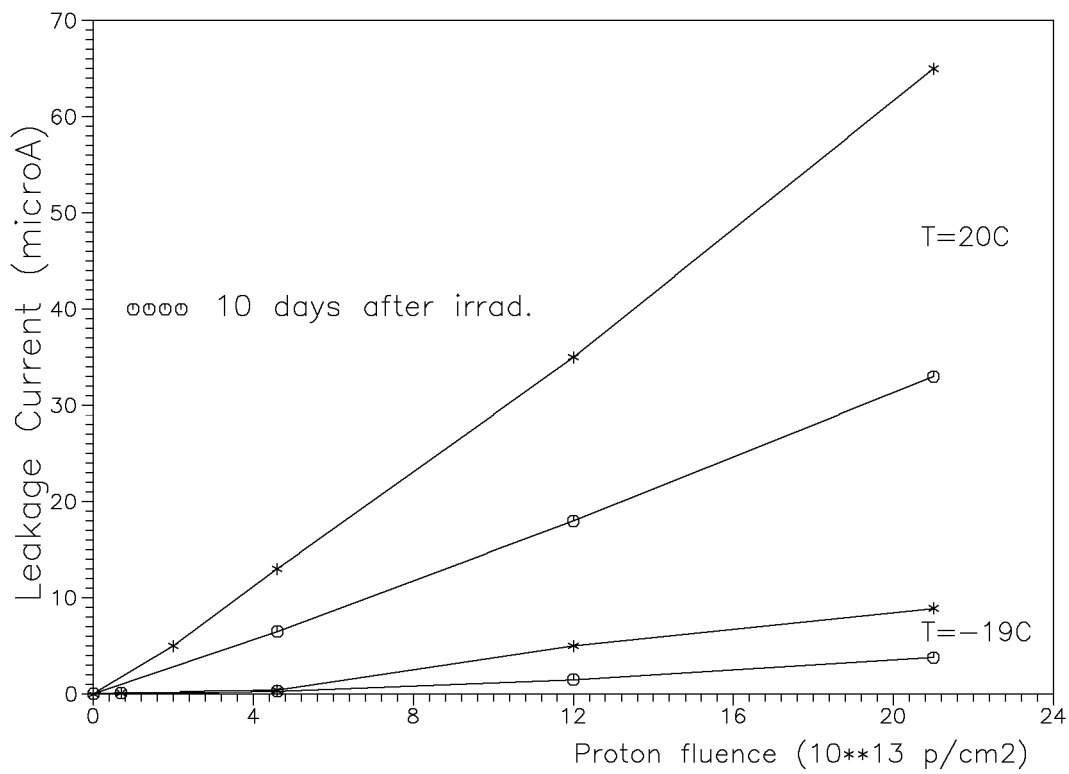


Рис. 7. Токи утечки в зависимости от температуры и потока протонов.

Все значения напряжения смещения, приведенные в этой работе, соответствуют значению напряжения, измеренному непосредственно на детекторе. В наших измерениях выбор величины напряжения полного обеднения детектора делался двумя способами. Следует отметить, что оба способа для необлученных детекторов давали одно и то же значение этой величины равное 67 В.

При первом способе на частоте 1 кГц измерялась вольт-фарадная характеристика  $p$ - $n$ -перехода. Строилась зависимость  $1/C^2$  от  $V$ , где  $C$  — величина емкости  $p$ - $n$ -перехода в пикофарадах,  $V$  — значение напряжения смещения в вольтах. Семейства зависимостей величины  $1/C^2$  от  $V$ , соответствующие различным значениям интегрального потока через детектор, для “теплых” и “холодных” детекторов приведены на рис.8 и 9.

Участок роста кривой и участок плато аппроксимировались уравнениями прямых линий. Значение напряжения смещения, соответствующее точке пересечения прямых, выбиралось в качестве величины напряжения полного обеднения. Аппроксимация участка роста кривой другими функциями давала приблизительно те же значения величины напряжения полного обеднения детектора.

Однако, как можно видеть из рис.8 и 9, для сильно облученных детекторов использование описанного выше способа затруднено, поскольку по мере роста уровня облучения детектора зона перегиба кривой “сглаживается”.

В этом случае величину напряжения полного обеднения детектора оказалось удобнее определять другим способом.

Детектор облучался со стороны  $p$ - $n$ -перехода  $\alpha$ -частицами от радиоактивного источника (в нашем случае  $Pu^{238}$ ). Строилась зависимость наиболее вероятного значения амплитуды “отклика” детектора на  $\alpha$ -частицу от величины напряжения смещения. Семейство этих зависимостей для “теплых” и “холодных” детекторов приведено на рис.10 и 11. Можно видеть, что, по мере увеличения напряжения смещения, зависимости, представленные на рис.10 и 11, имеют более четко выраженную зону выхода на плато, нежели полученные с использованием вольт-фарадных зависимостей. Величина напряжения смещения, соответствующая началу выхода кривой зависимости на плато, выбиралась в качестве значения напряжения полного обеднения. Полученная таким образом величина напряжения для необлученных детекторов хорошо согласуется со значением, полученным из вольт-фарадной зависимости.

Для “теплой” и “холодной” групп детекторов была построена зависимость значения величины напряжения полного обеднения детектора от уровня интегрального потока протонов, вызвавших радиационные повреждения. Эти зависимости приведены на рис.12. Известно, что величина напряжения полного обеднения детектора пропорциональна разности концентрации донорных и акцепторных примесей в детекторе. Из зависимости на рис.12, по положению минимума напряжения полного обеднения детектора, можно оценить величину интегрального потока протонов, по прохождении которого через детектор наблюдается инверсия  $n$ -типа проводимости. По нашей оценке, для кремниевых детекторов, облученных протонами с энергией 1 ГэВ, этот эффект наблюдается при достижении интегрального потока  $\Phi \approx 3 \cdot 10^{13}$  прот./см<sup>2</sup>.



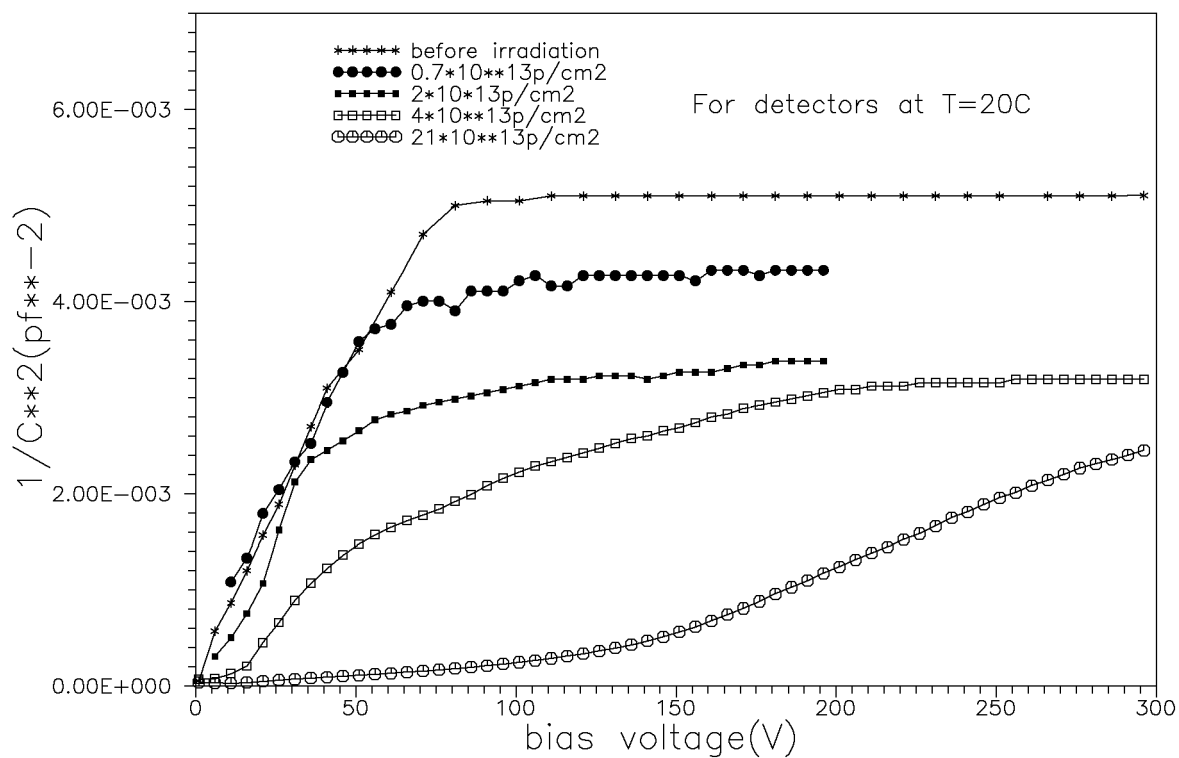


Рис. 8. C-V-зависимость для неохлажденных детекторов.

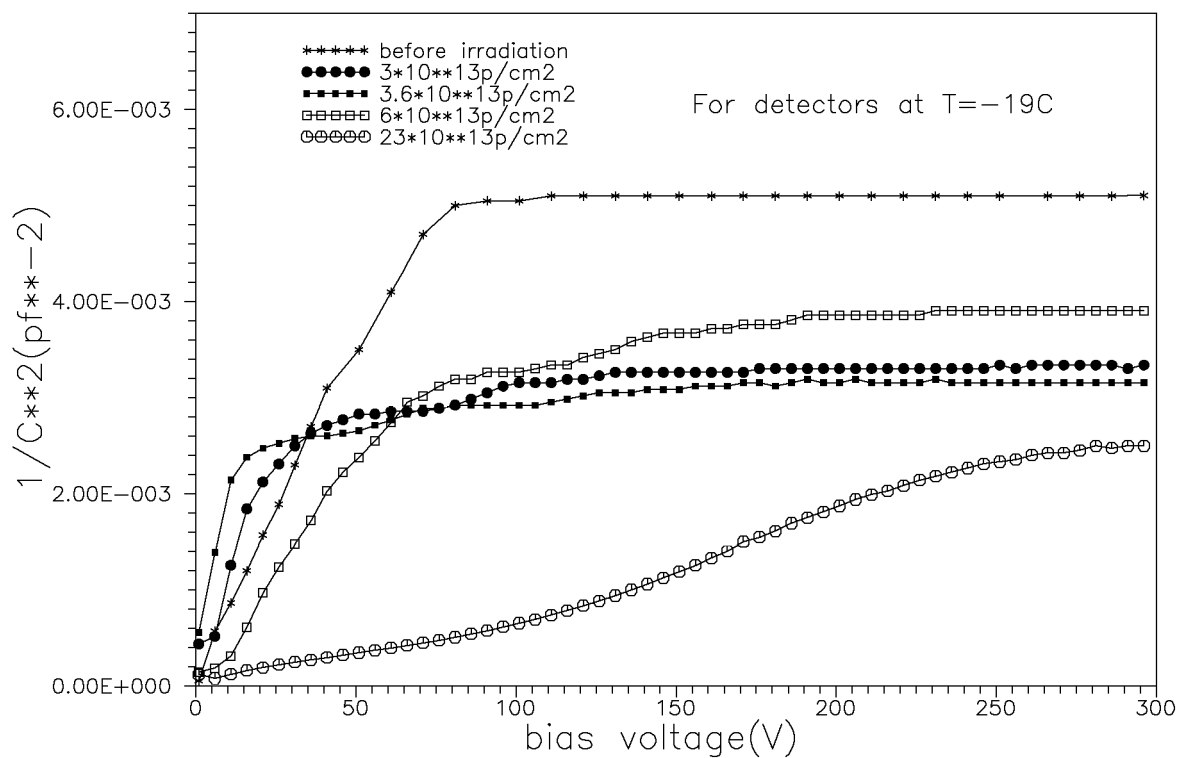


Рис. 9. C-V-зависимость для охлажденных детекторов.

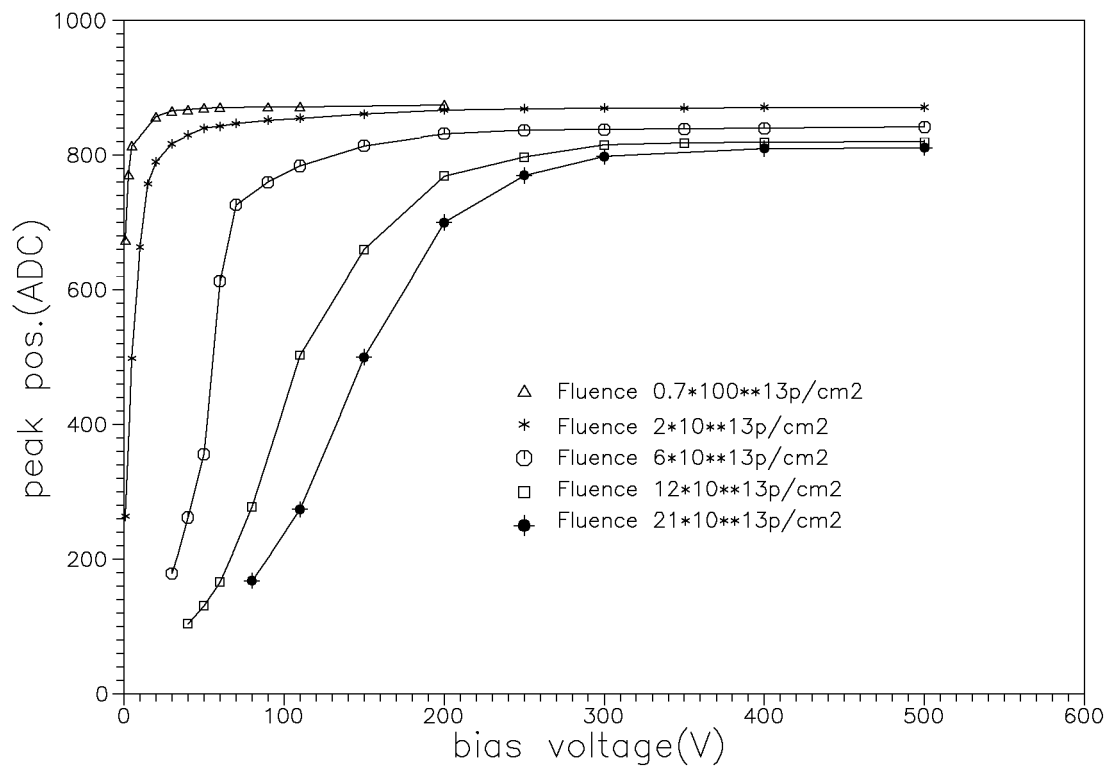


Рис. 10. Зависимость положения альфа-пиков от напряжения для неохлажденных детекторов.

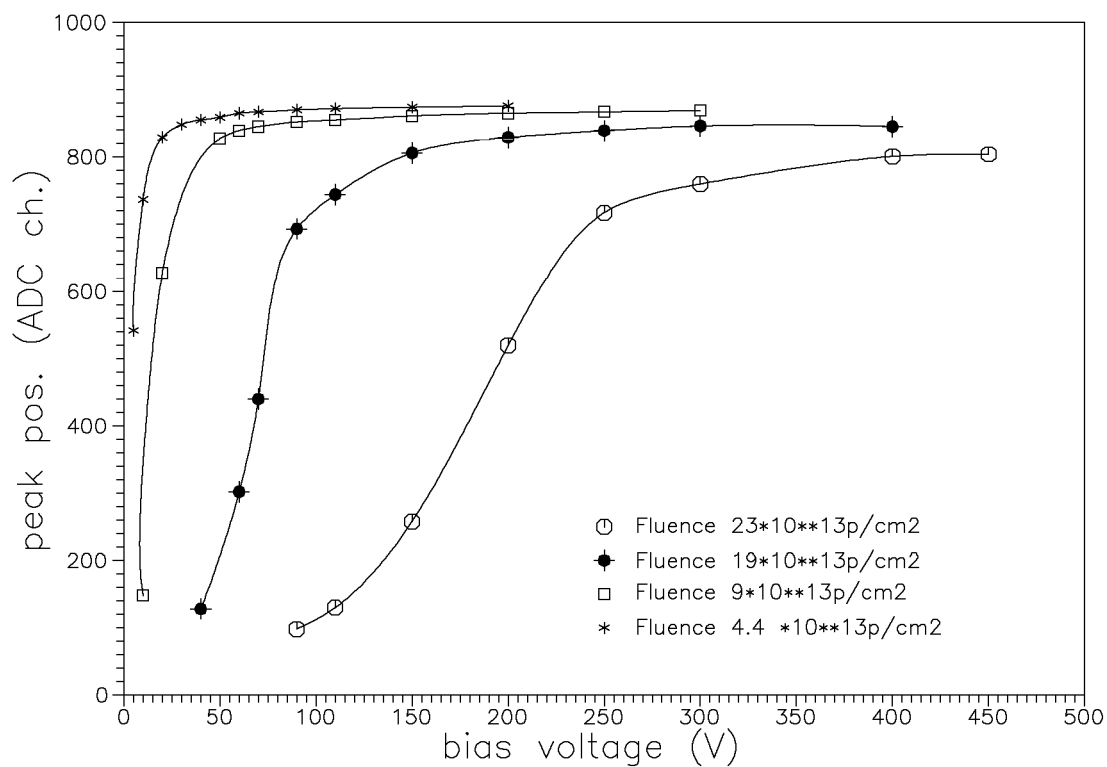


Рис. 11. Зависимость положения альфа-пиков от напряжения для охлажденных детекторов.

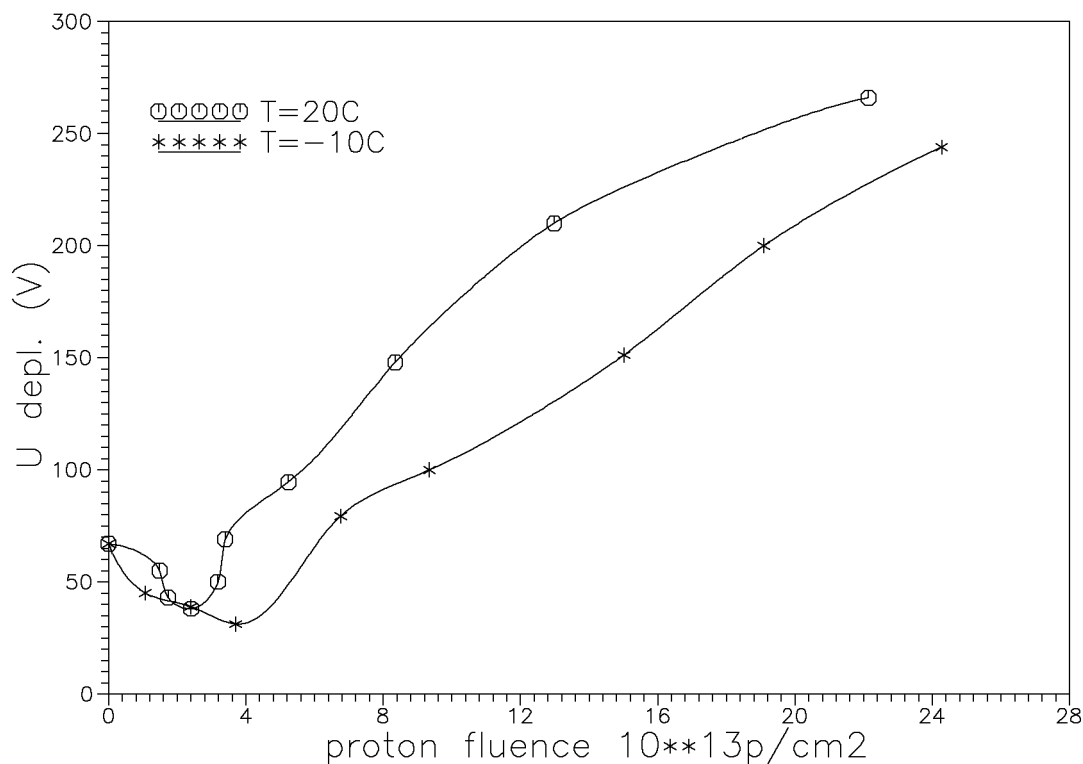


Рис. 12. Значение напряжения полного обеднения от потока протонов.

Измерение эффективности сбора заряда проводилось для необлученных и облученных “теплых” и “холодных” образцов с использованием  $\alpha$ -источника  $Pu^{238}$  с энергией  $\alpha$ -частиц  $E_\alpha = 5499$  кэВ. Величина заряда, зарегистрированного детектором от  $\alpha$ -частицы, определялась из калибровки измерительного тракта сигналом от генератора через калибровочную емкость. На рис.13 представлены значения эффективности сбора заряда “теплых” и “холодных” детекторов в зависимости от величины интегрального потока протонов. Видно, что при облучении детекторов потоками до уровня  $1,5 \cdot 10^{14}$  прот./см<sup>2</sup> эффективность сбора заряда у “холодных” образцов выше, чем у “теплых”, при больших значениях интегральных потоков они выравниваются и при потоке примерно равном  $2 \cdot 10^{14}$  прот./см<sup>2</sup> становятся одинаковыми. На рис.14,15 приведены спектры сигналов от  $\beta$ -источника  $Sr^{90}$ . Для “теплых” детекторов отделение сигнала от шума осуществляется после облучения их протонами до значения интегрального потока протонов примерно равного  $6 \cdot 10^{13}$  прот./см<sup>2</sup>, тогда как для “холодных” детекторов отделение сигнала от шума видно при интегральных потоках до  $10^{14}$  прот./см<sup>2</sup>.

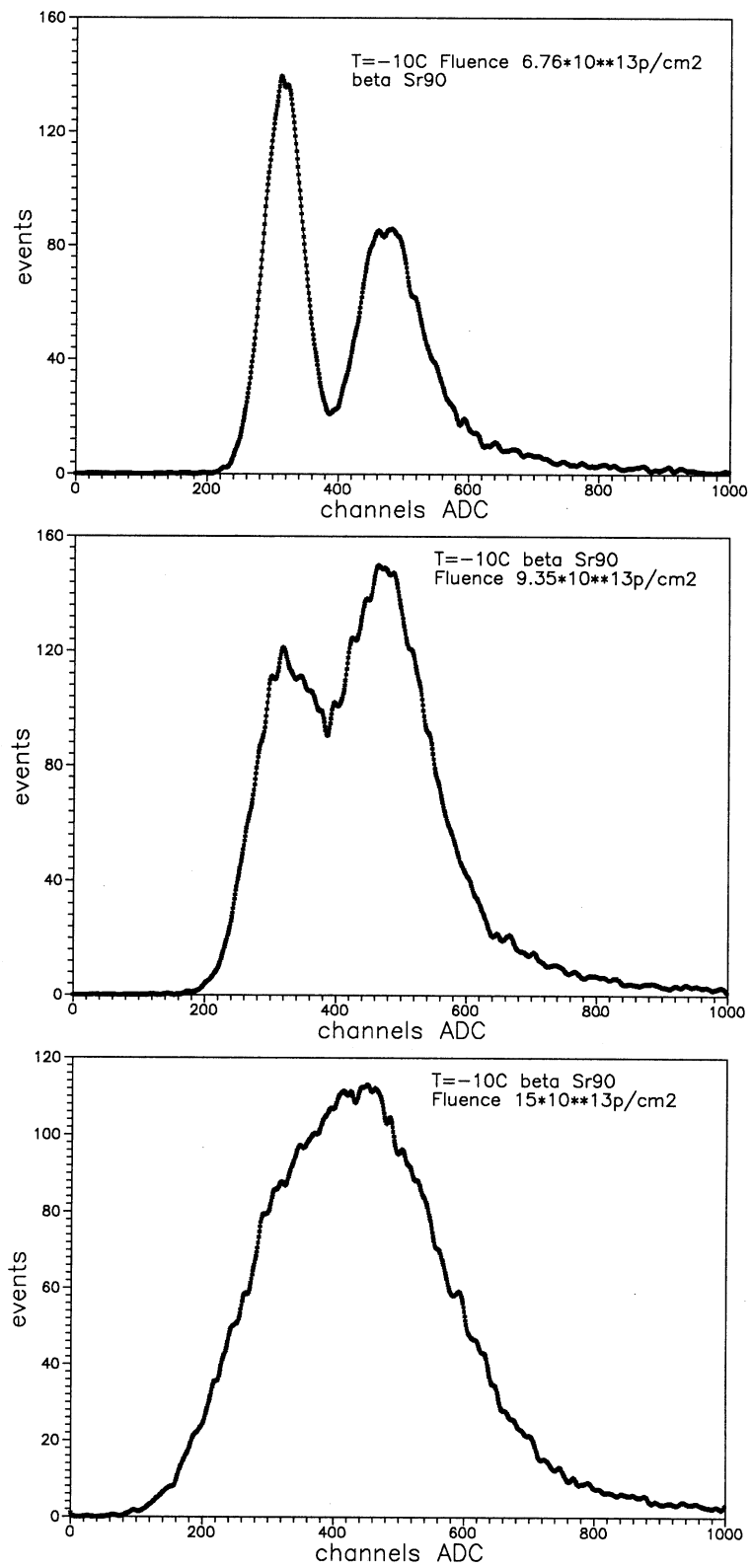


Рис. 13. Бета-спектры для холодных образцов.

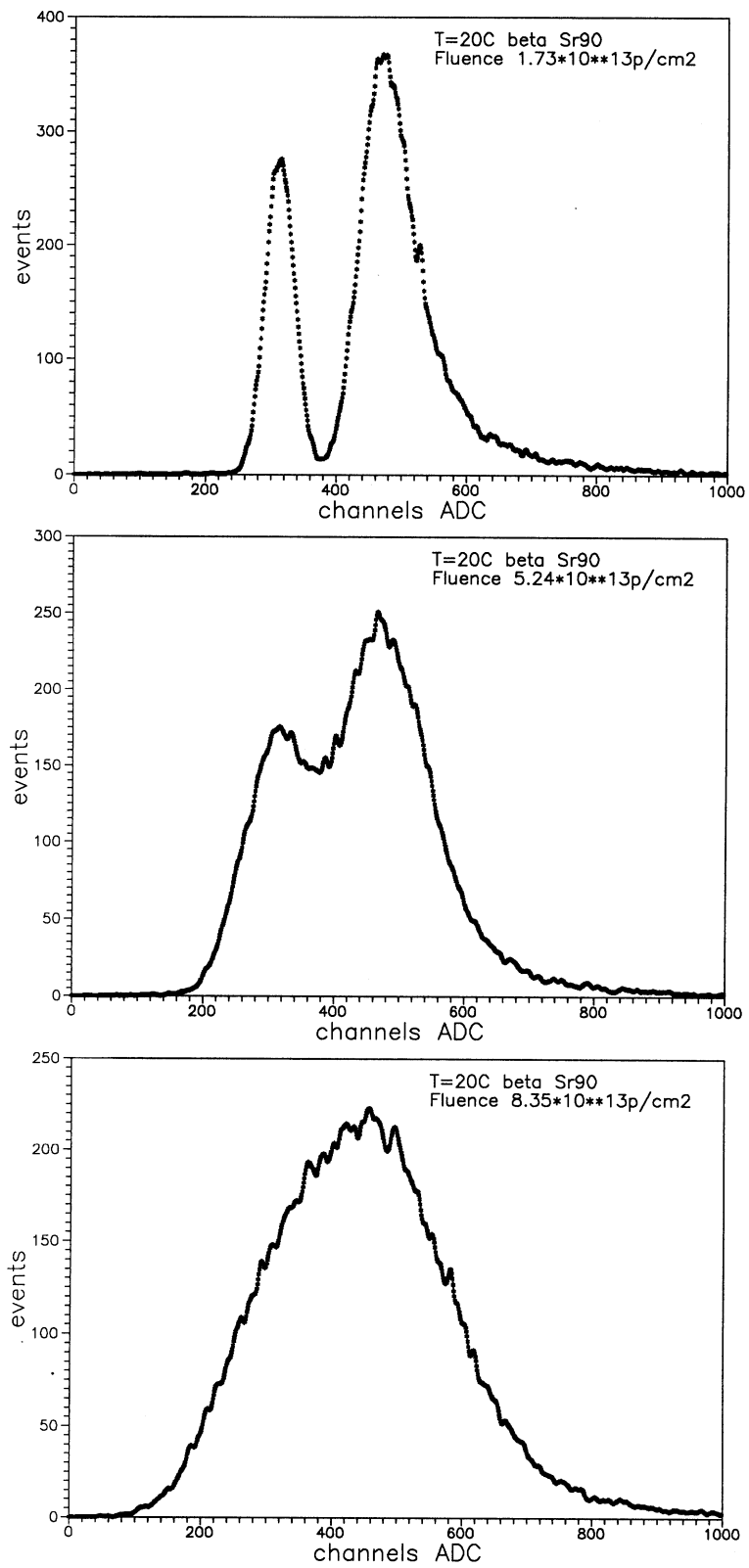


Рис. 14. Бета-спектры для теплых образцов.

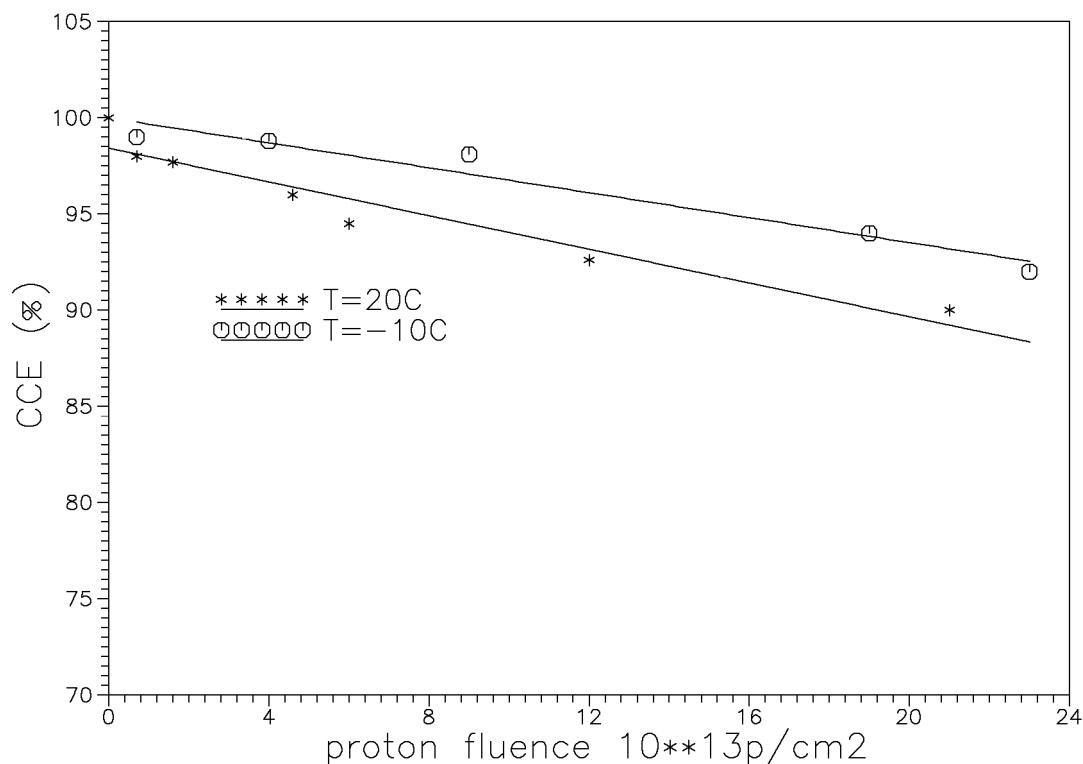


Рис. 15. Изменение эффективности сбора заряда от потока протонов.

## Основные результаты

Из сравнения изменения характеристик детекторов, наблюдающихся после облучения их пучком протонов с энергией 1 ГэВ при температуре  $-19^\circ\text{C}$  и  $19^\circ\text{C}$  следует, что константа радиационных повреждений “холодных” детекторов примерно на порядок меньше, чем у “теплых”. При потоках облучения до  $2,4 \cdot 10^{14}$  прот./ $\text{cm}^2$  напряжение полного обеднения для “холодных” детекторов примерно на 50 В ниже, чем для “теплых,” и в обоих случаях не превышает 300 В. При значении интегрального потока примерно равном величине  $3 \cdot 10^{13}$  прот./ $\text{cm}^2$  наблюдается инверсия исходного кремния  $n$ -типа в кремний  $p$ -типа. Эффективность сбора заряда в детекторе уменьшается с ростом потока облучения и при достижении интегральным потоком величины примерно равной  $2,4 \cdot 10^{14}$  прот./ $\text{cm}^2$  составляет около 90% для “теплых” и 95% для “холодных” детекторов.

В заключение авторы благодарят коллектив бустера У-70 за помощь в проведении сеанса облучения и Г.И. Бритвича за обсуждение и консультации.

## Список литературы

- [1] Ermolov P., Egorov N., Karmanov D., Leflat A. et al. Design and performance of the forward  $H$ -disks of  $D0$  silicon tracker. Moscow State University. Preprint 97-22/473, Moscow, 1997.
- [2] Radiological safety aspects of the operation of proton accelerators // IAEA Technical Reports series 283, Vienna, 1998.  
Barbier M. Induced radioactivity. Amsterdam: North Holland, 1969.  
Knoll, Glenn F. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, Inc, 1989.
- [3] Sicho P., Blanquard L., Clemens J.-C., Delpierre P., Mouthuy T. Measurements of Properties of Highly Irradiated  $p^+n$  Pixel Detector Structure. ATLAS Internal Note INDET-NO-189, 10 November 1997.

*Рукопись поступила 8 апреля 1999 г.*

Н.К. Булгаков и др.

Влияние охлаждения на радиационную стойкость кремниевых детекторов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .

Редактор Л.Ф. Васильева.

Технический редактор Н.В. Орлова.

---

Подписано к печати 12.04.99. Формат  $60 \times 84/8$ .      Офсетная печать.

Печ.л. 1,62.    Уч.-изд.л. 1,24.    Тираж 150.    Заказ 88.    Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.



