

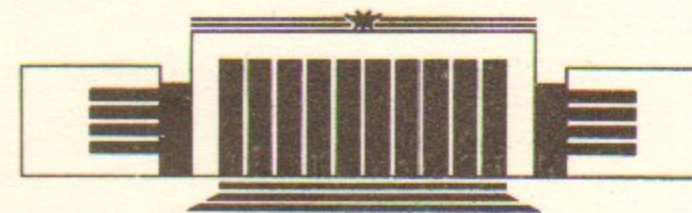


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

И.П. Долбня, С.Г. Курыло

**АБСОЛЮТНАЯ
СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ
ФОТОДИОДНЫХ ЛИНЕЕК
В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ 7—20 кэВ**

ПРЕПРИНТ 91-8



НОВОСИБИРСК

Абсолютная спектральная чувствительность фотодиодных линеек в рентгеновском диапазоне 7—20 кэВ

И.П. Долбня, С.Г. Курыло

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена исследованию абсолютной спектральной чувствительности фотодиодных линеек (типа ЛФ1024-25/2) как однокоординатных рентгеновских детекторов в диапазоне энергий рентгеновского излучения от 7 до 20 кэВ. Получены оценки пороговой чувствительности таких детекторов в указанном спектральном диапазоне. Измерения проводились с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3М.

Absolute spectral sensitivity of an linear photo-diode arrays in x-ray energy range 7—20 keV

I.P. Dolbnya, S.G. Kurylo

Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk 90, USSR

ABSTRACT

The results of the investigation of absolute spectral sensitivity of an linear photo-diode arrays (the such of kind LF1024-25/2) as an X-ray one-coordinate detectors in the energy range from 7 to 20 keV are presented. The estimations of the threshold sensitivity of such detectors in this spectral range were obtained. The measurements have been carried out with the use synchrotron radiation from VEPP-3M storage ring.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое распространение в качестве рентгеновских детекторов получили различные полупроводниковые приборы (приборы с зарядовой связью (ПЗС), фотодиодные, микрополосковые и проч.). Из всего разнообразия систем регистрации рентгеновских изображений с использованием подобных приборов можно выделить две основных схемы.

Во-первых, это использование таких приборов совместно с различными преобразователями рентген-свет, в качестве которых могут служить, например, люминофорные экраны, с последующей передачей оптического изображения с помощью волоконной оптики или системы линз, а также рентгеновские электронно-оптические преобразователи с микроканальными пластинами в качестве усилителя яркости и прочие.

Во-вторых, непосредственная регистрация рентгеновского излучения полупроводниковыми приборами.

Наиболее простой в техническом исполнении выглядит вторая схема, к достоинствам которой можно отнести высокую чувствительность к рентгеновскому излучению, а также принципиальную возможность работы в режиме счета отдельных рентгеновских квантов при использовании глубокого охлаждения детектора. В условиях непосредственной регистрации рентгеновского излучения становится важным вопрос о радиационной стойкости используемых детекторов. Наименее радиостойкими являются ПЗС-детекторы. Предельно допустимые дозы для них лежат в районе десятков килоРад [1]. Пределы дозовых нагрузок для микрополосковых и фотодиодных приборов значительно выше и могут составлять значения от 1 Мрад до 10 Мрад. Не менее заслуживающей внимания является задача калибровки спектральной чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению в используемом диапазоне энергий квантов.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование

абсолютной спектральной чувствительности кремниевых фотодиодных линеек (ФДЛ) [2] типа ЛФ1024-25/2, содержащих 1024 фотодиода с размерами 19×150 мкм и шагом структуры равным 25 мкм, в диапазоне энергий рентгеновских квантов от 7 до 20 кэВ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ, РЕЗУЛЬТАТЫ, ОБСУЖДЕНИЕ

Для работы с рентгеновским излучением с микросхемы ФДЛ удалялось защитное кварцевое стекло, а на его место приклеивалась бериллиевая фольга толщиной около 250 мкм. Кроме того, непосредственно на кристалл ФДЛ устанавливался дополнительный коллиматор, представляющий собой две пришлифованные друг к другу танталовые накладки толщиной 4 мм с зазором между ними ~ 100 мкм. Коллиматор предохранял от нежелательного воздействия радиации усилительные, на каждый диод, элементы кристалла микросхемы, реализованные на МДП-транзисторах. ФДЛ эксплуатировалась при комнатной температуре. Конструкция детектора с ФДЛ представлена на рис. 1.

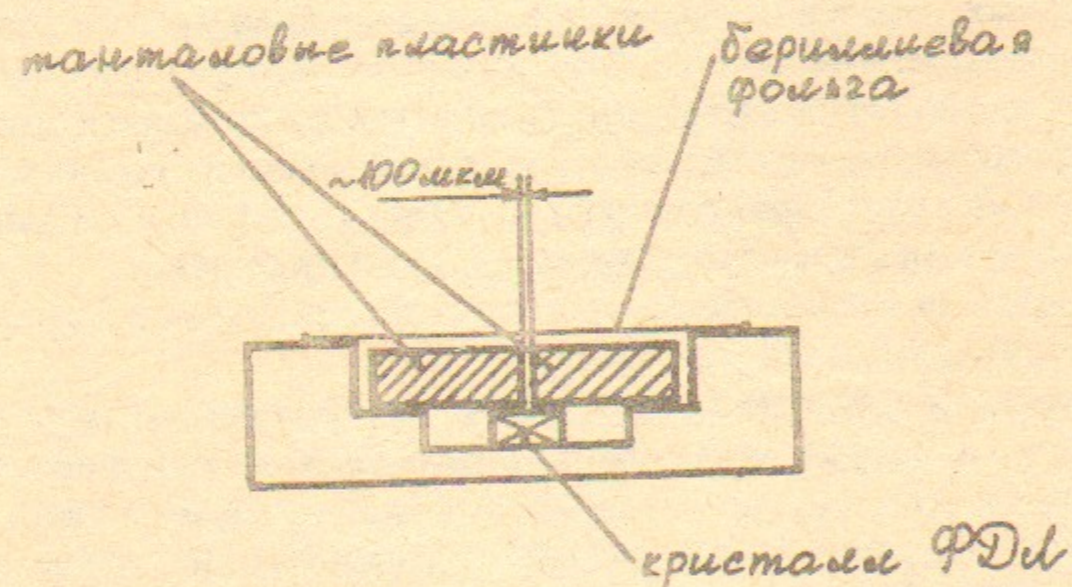


Рис. 1. Конструкция детектора с фотодиодной линейкой.

Измерения были проведены с использованием синхротронного излучения (СИ) из вигглер-магнита, установленного на накопителе ВЭПП-3М (2 ГэВ, 100 мА, 20 кГц), на канале вывода СИ N 5а [3]. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Монохроматизация излучения осуществлялась при помощи монолитного двухкристального (Si(111)) кремниевого монохроматора ($\Delta\lambda/\lambda = 4-5 \cdot 10^{-4}$). Сканирование по энергии осуществлялось с шагом 1 кэВ. Для нормировки на плотность

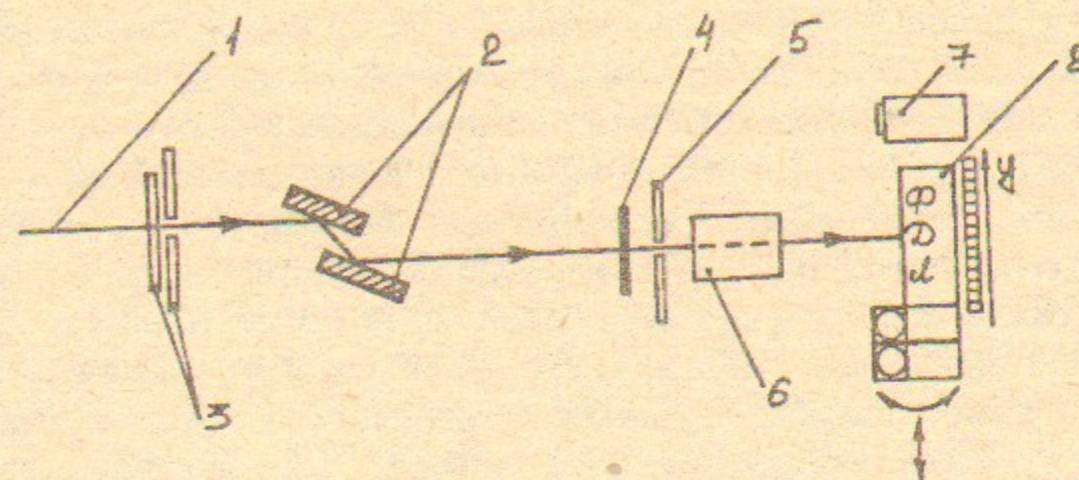


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1—пучок СИ; 2—кристалл-монохроматор; 3—коллимационные щели; 4—ослабитель (Al); 5—коллиматор; 6—ионизационная камера (пролетная); 7—сцинтилляционный детектор; 8—фотодиодная линейка.

падающего на ФДЛ потока рентгеновского излучения использовалась пролетная ионизационная камера (ИК), наполненная азотом под давлением 1 атм. Перед началом измерений с ФДЛ ионизационная камера была прокалибрована по потоку фотонов для разных энергий. Для этого по месту расположения ФДЛ устанавливался сцинтилляционный детектор на ФЭУ-130, включенном в счетном режиме, который позволял проводить абсолютные измерения входного потока. Для ограничения загрузки на ФЭУ перед ИК во время калибровочных измерений ставился алюминиевый фильтр-ослабитель. Управление монохроматором, коллимационными щелями, координатными подвижками, а также получение и обработка данных с ФДЛ, ИК, сцинтилляционного детектора проводились при помощи микроЭВМ (PDP 11/23 PLUS).

По условиям отражения от плоскости (111) в рефлексе возможно присутствие как фотонов с длиной волны соответствующей основной гармонике отражения, так и фотонов с длиной волны в 3 раза меньшей (3-я гармоника), относительная интенсивность которых, однако, достаточно мала и заметно уменьшается с ростом энергии фотонов. При работе с сцинтилляционным детектором имелась возможность амплитудного анализа, что позволяло в спектре падающих фотонов выделять и учитывать фотоны с нужной энергией. Относительная интенсивность 3-ей гармоники на энергии основной гармоники 7.11 кэВ составляла $\sim 3\%$ и уже на энергии 9 кэВ становилась пренебрежимо малой. Ввиду этого корректировка данных для ИК и ФДЛ, учитывающая наличие 3-ей гармоники, не производилась.

Калибровка ИК заключалась в нахождении отношения загрузки сцинтилляционного детектора к показанию ИК (кГц/мВ) для разных

энергий фотонов. При этом необходимо было учитывать зависимость эффективности регистрации сцинтилляционного детектора от энергии фотонов. В детекторе использовался стандартный сцинтиллятор NaI(Tl) (типа СДН.03-03), представляющий собой диск диаметром ~ 25 мм и толщиной 1.5 мм, покрытый алюминиевой фольгой толщиной 30 мкм и герметически упакованный в контейнер. Контейнер имел бериллиевое входное окно толщиной 240 мкм (сравнимая с толщиной бериллиевой фольги на ФДЛ). Таким образом, учитывая поглощение в алюминиевой фольге и в самом материале NaI(Tl) сцинтиллятора, эффективность регистрации сцинтилляционным детектором, $\epsilon_{\text{рег}}$ можно записать так:

$$\epsilon_{\text{рег}}(E) \approx e^{-\mu_{\text{ф}}(E) \cdot \rho \cdot l_{\text{ф}}} \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{с}}(E) \cdot \rho \cdot l_{\text{с}}})$$

где E — энергия фотонов, $\mu_{\text{ф}}$, $\rho_{\text{ф}}$, $l_{\text{ф}}$, $\mu_{\text{с}}$, $\rho_{\text{с}}$, $l_{\text{с}}$ — полные массовые коэффициенты поглощения, плотности и толщины, соответственно, алюминиевой фольги и сцинтиллятора. В таблице 1 приведены значения $\epsilon_{\text{рег}}$ для разных энергий фотонов. Данные для коэффициентов поглощения были взяты из [4].

Для проведения измерений по определению абсолютной чувствительности ФДЛ устанавливалась на координатной подвижке (диапазон перемещений — 50 мм, шаг — 1 мкм), что позволяло перемещать ФДЛ по высоте (вдоль оси симметрии ФДЛ). Подвижка, в свою очередь, была закреплена на гониометре, который обеспечивал настройку по углу на максимум пропускания входного коллиматора ФДЛ (см. рис. 2). Программа управления ФДЛ позволяла задавать время накопления, производить заданное число циклов накопления (число измерений) с последующим усреднением полученных данных по числу измерений, работать в режимах с вычитанием и без вычитания предварительно накопленного фона. Одновременно снимались показания с ИК. Режим с вычитанием фона позволял убирать фоновую подставку и выделять только полезный сигнал. Кроме того, программа давала возможность по заданной группе ячеек ФДЛ (зоне) вычислять среднеарифметическое отсчетов в ячейках по зоне и центр тяжести засвеченного пятна по зоне. При сканировании по энергии монохроматором положение рефлекса по высоте менялось. Информация о центре тяжести по зоне давала возможность подстраивать положение ФДЛ, так чтобы в процессе сканирования по энергии положение падающего рефлекса на ФДЛ и, соответственно, область засвечиваемых ячеек ФДЛ оставались неизменными.

Геометрические размеры рефлекса в месте расположения ФДЛ определялись по вертикали — размером коллиматора перед ИК (0.5 мм), и по горизонтали — размером соответствующей коллимационной щели перед

монохроматором (см. рис. 2). Рефлекс в месте расположения ФДЛ был сфотографирован на фотопластинку (МР-10). Зная размеры рефлекса, зазор между танталовыми накладками входного коллиматора ФДЛ, размеры ячейки ФДЛ, заданное время накопления и используя калибровочную кривую для ИК, можно было вычислить число рентгеновских квантов, попавших на одну ячейку ФДЛ за время накопления.

За меру абсолютной чувствительности ФДЛ, κ , принималась величина, равная отношению максимального значения измеренного 10-разрядным АЦП сигнала по области засвечиваемых ячеек ФДЛ, усредненного по числу измерений, к числу рентгеновских квантов, попавших на одну ячейку за время накопления. На рис. 3 представлен график зависимости величины κ от энергии фотонов для времени накопления равном 20 мсек

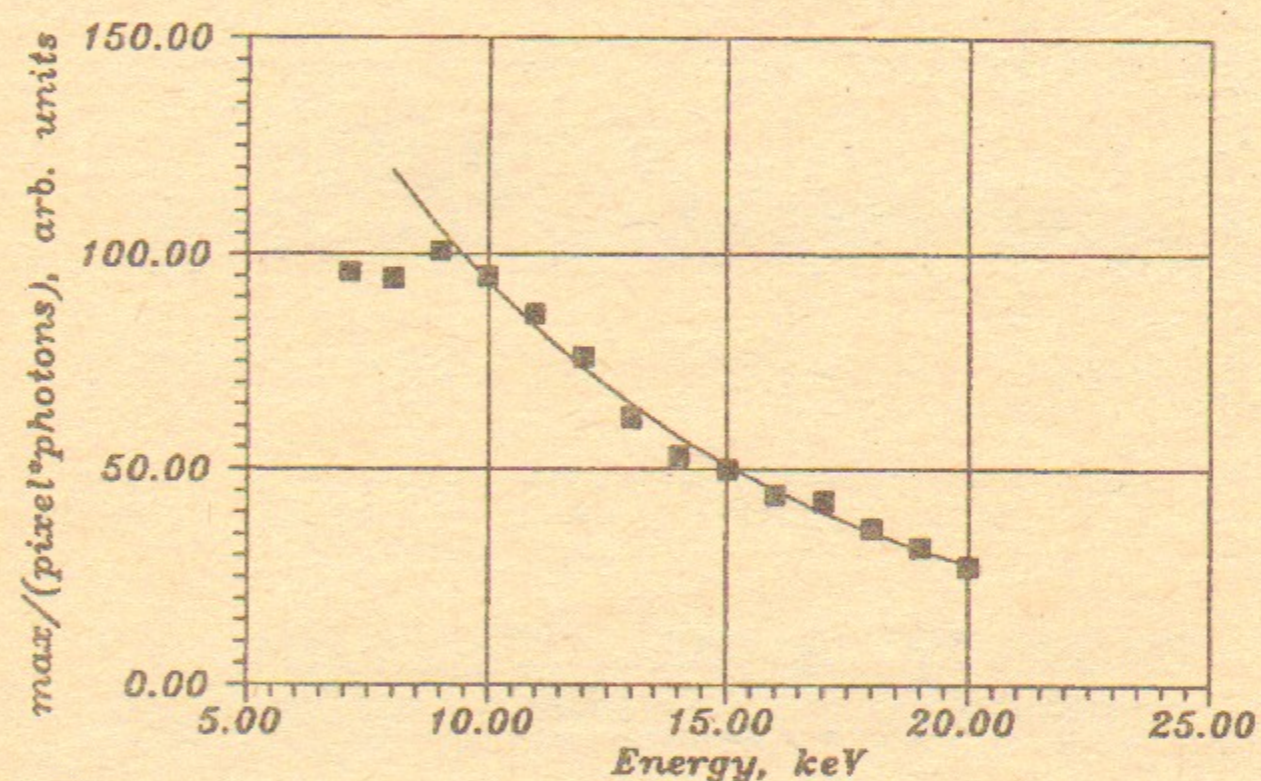


Рис. 3. Абсолютная спектральная чувствительность ФДЛ в κ зависимости от энергии рентгеновских квантов.

и при числе измерений равном 8. Наименьшее значение составляет 27.3 при энергии фотонов 20 кэВ, наибольшее — 100.8 при 9 кэВ. Систематическая ошибка измерений (30—40%) связана, в основном, с неточностью определения зазора между танталовыми накладками входного коллиматора ФДЛ. На том же графике приведен результат аппроксимации экспериментальных точек (для диапазона от 10 до 20 кэВ) экспонентой, оказавшейся наилучшим приближением к данному набору точек. Использовался метод наименьших квадратов.

Экспоненциальный характер поведения кривой в области от 10 до 20 кэВ можно объяснить экспоненциальной зависимостью поглощения в кремниевой подложке ФДЛ. В общем случае, эффективность регистрации ФДЛ рентгеновского излучения должна быть пропорциональна энергии и доле поглотившихся в ФДЛ рентгеновских фотонов, т. е. величине $E/\epsilon_c(1-\exp(-\mu(E)\cdot\rho\cdot t))$, где E — энергия фотонов, ϵ_c —энергия образования одной электронно-дырочной пары (3.6 эВ для кремния), $\mu(E)$ — массовый коэффициент поглощения в кремнии, ρ —плотность, а в каче-

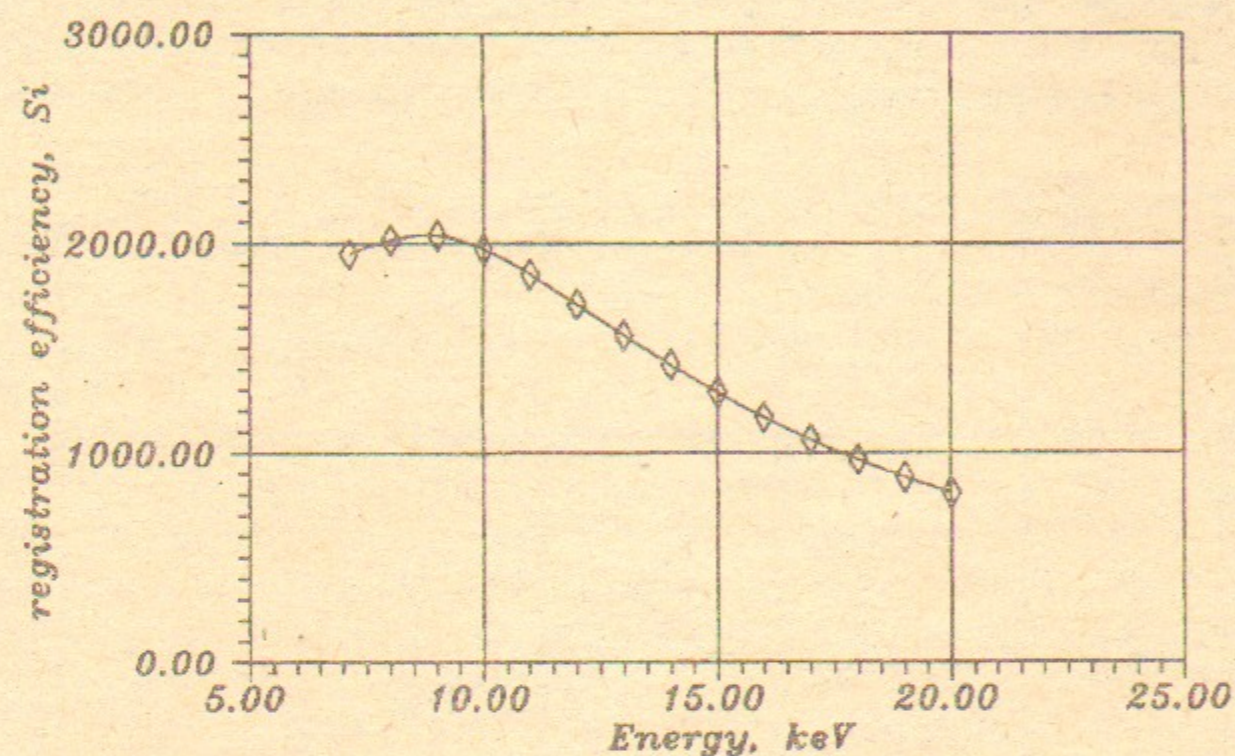


Рис. 4.

стве t можно взять диффузионную длину, которая для используемых ФДЛ может составлять от 10 до 150 мкм. На рис. 4 представлена зависимость этой величины от энергии для t равной 150 мкм.

Ширина шумовой дорожки по максимальному значению составляла величину порядка 20—25 при том же времени накопления (20 мсек). Таким образом, полученные данные могут свидетельствовать о том, что ФДЛ обладает квантовой пороговой чувствительностью к рентгену в исследованном энергетическом диапазоне.

Кроме измерений абсолютной спектральной чувствительности, было проведено исследование радиационной стойкости используемых ФДЛ. На рис. 5а представлено распределение по ячейкам темнового тока ФДЛ после набора дозы ~3.6 Мрад (спустя примерно неделю после облучения). Из рисунка видно, что темновой ток в области засвеченных ячеек ФДЛ возрос примерно в 4.5 раза. После двух прогревов до ~250°C (длительно-

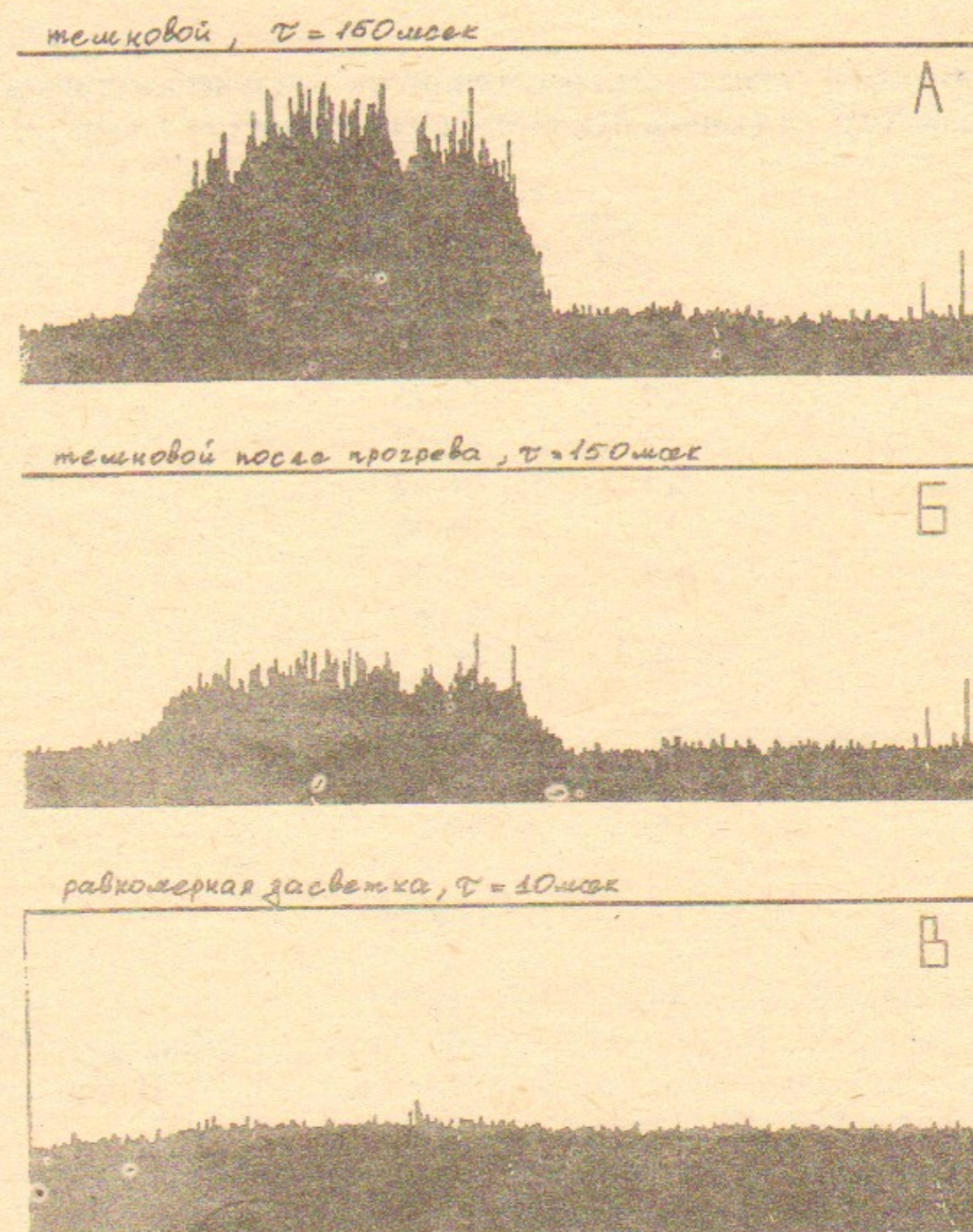


Рис. 5.

стью около 3 мин) удалось уменьшить темновой ток в ~2.3 раза (рис. 5б). Однако, при равномерной засветке ФДЛ видимым светом (использовалось матовое стекло) распределение тока по ФДЛ оказалось практически равномерным по всем ячейкам ФДЛ (рис. 5в). Этот факт может свидетельствовать о том, что после облучения чувствительность ФДЛ по ячейкам практически не изменилась.

В заключение авторам хотелось бы выразить благодарность Путьмакову А.Н., Овчару В.К., Лабусову В.А., Попову В.И. за всестороннюю помощь и поддержку в работе.

Таблица 1.

Эффективность регистрации рентгеновского излучения сцинтиллятором NaI(Tl) (типа СДН.03-03) в зависимости от энергии.

| <i>E</i> , кэВ | $\epsilon_{рег}$, % |
|----------------|----------------------|
| 7.11 | 55.876 |
| 8 | 66.16 |
| 9 | 74.7 |
| 10 | 80.75 |
| 11 | 85.13 |
| 12 | 88.32 |
| 13 | 90.68 |
| 14 | 92.44 |
| 15 | 93.8 |
| 16 | 94.85 |
| 17 | 95.672 |
| 18 | 96.326 |
| 19 | 96.818 |
| 20 | 97.25 |

ЛИТЕРАТУРА

1. C.J.S. Damerell. RAL, 86-077, July, 1986.
2. В.Г. Десятков, С.В. Магденко, Л.В. Финогенов. Автометрия, 1987, N 5.
3. Краткое описание экспериментальных станций СИ. Препринт 90-92 ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1990.
4. Коэффициенты ослабления рентгеновского излучения. Методические рекомендации./Авторы-составители: А.Л. Залысов, А.С. Ганеев, И.М. Израилев, Н.И. Савин, В.Н. Сапрыкин.-Л., ЛНПО "Буревестник", 1975. 134 с.

И.П. Долбня, С.Г. Курыло

Абсолютная спектральная чувствительность
фотодиодных линеек в рентгеновском
диапазоне 7—20 кэВ

Ответственный за выпуск: С.Г. Попов

Работа поступила 17 января 1991 г.

Подписано в печать 17.01 1991 г.

Формат бумаги 60 × 90 1/16. Объем 0,9 печ.л., 0,8 уч.-изд.д.

Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 8.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск, 90.