



Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

*В. 99
1999*

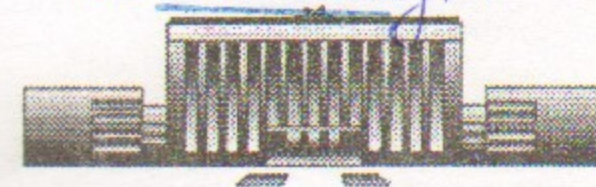
Л.Н. Вячеславов, В.Ф. Гурко, В.Ф. Жаров,
К.Э. Купер, В.В. Лях, О.И. Мешков, А.Д. Николенко

КАЛИБРОВКА ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ
В БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИ НАКОПИТЕЛЯ
ВЭПП-2М

ИЯФ 99-25

<http://www.inp.nsk.su/publications>

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН СССР
ИНВ. № *2м.*



НОВОСИБИРСК

1999

Сибирское отделение Российской Академии наук

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

Калибровка лавинных фотодиодов в ближнем инфракрасном диапазоне с использованием СИ накопителя

ВЭПП-2М

Вячеславов Л.Н., Гурко В.Ф., Жаров В.Ф., Купер К.Э., Лях В.В.,
Мешков О.И., Николенко А.Д.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Л.Н. Вячеславов, В.Ф. Гурко, В.Ф. Жаров,
К.Э. Купер, В.В. Лях, О.И. Мешков, А.Д. Николенко

КАЛИБРОВКА ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ
В БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИ НАКОПИТЕЛЯ

ВЭПП-2М

Calibration of avalanche photodiodes at near-IR spectral range by
using synchrotron radiation of VEPP-2M storage ring.

L.N. Vyacheslavov, V.F. Gurko, V.F. Zharov, K. Ev. Kuper,
V.V. Lyah, O.I. Meshkov, A. D. Nikolenko

ИЯФ 99-25

Budker Institute of Nuclear Physics

Lavrentyev av. 11, Novosibirsk 630090, Russia.

Abstract

The schematic and calibration procedure of the photodiodes for Thomas
scattering system have described. The avalanche photodiodes S30855 and
S30856 in combination with wideband, avalanche amplifier were used. The
synchrotron radiation of VEPP-2M storage ring has used for measuring of temporal
response and absolute sensitivity of the diodes. Temporal resolution at 3.5 ps
and responsivity at $1.5 \cdot 10^7$ W/W (at 10%) not were reached.

НОВОСИБИРСК

1999

**Калибровка лавинных фотодиодов в ближнем
инфракрасном диапазоне с использованием СИ накопителя**

ВЭПП-2М

*Вячеславов Л.Н., Гурко В.Ф., Жаров В.Ф., Купер К.Э., Лях В.В.,
Мешков О.И., Николенко А.Д.*

Институт ядерной физики им Г.И. Будкера СО РАН
630090 Новосибирск, Россия

Аннотация

В последние годы системы томсоновского рассеяния на плазменных установках все чаще используют лазеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра, а для регистрации рассеянного излучения применяются лавинные фотодиоды. В экспериментах на установке ГОЛ-М [4] используются два типа таких детекторов. Их внутреннего усиления, однако, недостаточно и требуется применение широкополосных малошумящих предусилителей. Целью данной работы являлась разработка фотодетектора с усилением около 10^4 и быстродействием 3-4 нсек. Для тестирования ФД использовалось синхротронное излучение накопителя ВЭПП-2М.

**Calibration of avalanche photodiodes at near-IR spectral range by
using synchrotron radiation of VEPP-2M storage ring.**

*L.N. Vyacheslavov, V.F. Gurko, V.F. Zharov, K. Ev. Kuper,
V.V. Lyah, O.I. Meshkov, A.D. Nikolenko.*

Budker Institute of Nuclear Physics
Lavrentyev av. 11, Novosibirsk 630090, Russia.

Abstract

The schematic and calibration procedure of the photodetector for Thomson scattering system have described. The avalanche photodiodes C30955E and C30985E in combination with wide-band, low-noise amplifier were used. The synchrotron radiation of VEPP-2M storage ring has used for measuring of temporal response and absolute sensitivity of the detectors. Temporal resolution at 3.5 ns and responsivity at $1.5 \cdot 10^6$ V/W ($\lambda = 1060$ nm) were reached.

1. Введение

В последние годы все большее распространение получают системы томсоновского рассеяния для диагностики плазмы, основанные на лазерах, излучающих в ближней инфракрасной области [1]. Это связано с тем, что фоновое излучение плазмы, определяющее соотношение сигнал/шум в экспериментах по рассеянию, как правило меньше в этой области спектра по сравнению с видимым диапазоном, кроме того длина волны излучения как самых мощных (стекло с Nd), так и коммерческих частотных лазеров (Nd:YAG) находится вблизи 1060 нм. К сожалению, неизвестны фотокатоды, обладающие высоким квантовым выходом на данной длине волны (чувствительность кислородно-цезиевого фотокатода равна 0.1 мА/Вт при квантовом выходе около 0.1 %), поэтому использование фотоэлектронных умножителей для регистрации рассеянного излучения не представляется возможным. Характеристиками, подходящими для использования в системах томсоновского рассеяния, обладают лавинные фотодиоды. Их единственный недостаток состоит в сравнительно малом (до нескольких мм) размере светочувствительного элемента. В экспериментах на установке ГОЛ-М [4] используются два типа таких детекторов, С30955Е и С30985Е, их параметры приведены в табл. 1 и на рис. 1.

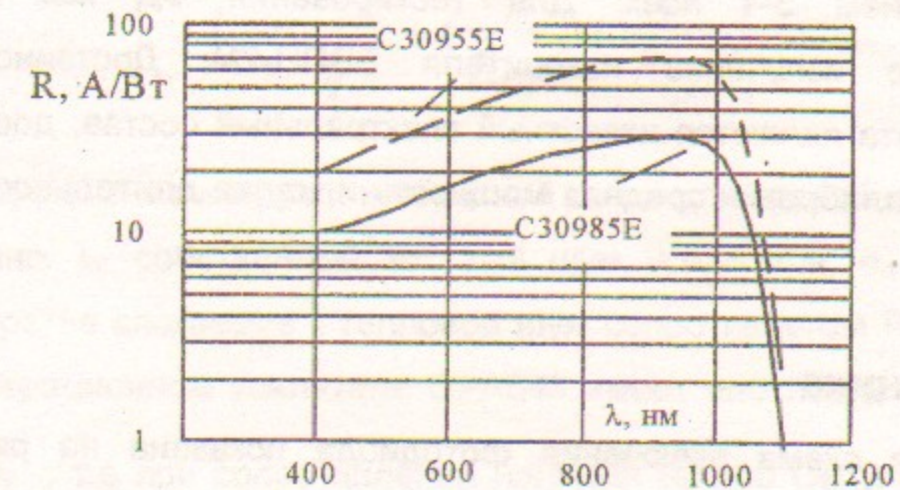


Рис. 1. Спектральная чувствительность ЛФД.

Табл. 1. Типичные параметры ЛФД.

| Электрические характеристики | С30955Е | С30985Е |
|------------------------------|--|-------------------------|
| | Диаметр фото-чувствительной области 1 мм | 25 элементов 0.3×0.3 мм |
| Напряжение питания | 300 | 400 |
| Чувствительность, А/Вт | 900 нм | 75 |
| | 1060 нм | 36 |
| | 1150 нм | 5 |
| Квантовый выход, % | 900 | 85 |
| | 1060 | 36 |
| | 1150 | 5 |
| Темновой ток, нА | 50 | 1 |
| Емкость, пФ | 2 | 0.5 (одного элемента) |
| Подъем/спад сигнала, нсек | 2 | 2 |

В системе томсоновского рассеяния нами применяется лазер на стекле с Nd с энергией в импульсе около 40 Дж, что в несколько раз больше характерной для данного типа диагностики величины, однако и при этом внутреннего усиления ЛФД недостаточно для уверенной регистрации сигналов рассеяния и возникает необходимость в использовании предусилителей. Очевидно, их параметры должны быть такими, чтобы не слишком ухудшить обнаружительную способность (т.е. шумовые характеристики) и временное разрешение ЛФД. Целью данной работы являлась разработка фотодетектора с усилением около 10^4 и быстродействием 3-4 нсек. Для тестирования ФД мы использовали синхротронное излучение накопителя ВЭПП-2М. Достоинствами этого источника света являются известный спектральный состав, достаточная для абсолютной калибровки средняя мощность и малая длительность импульсов (300 псек).

2. Электроника

Традиционная схема включения фотодиода показана на рис.2а. Сигнал $U_{\text{вых}} = I_{\text{лфд}} * R_f$, временное разрешение $\tau = C_{\text{лфд}} * R_f$. Практически значение $C_{\text{лфд}}$ определяется, помимо собственной емкости фотодиода, также и паразитной

емкостью монтажа. Для ее компенсации и согласования ЛФД с предусилителем рекомендуется [3] применять токовый повторитель (транsimpедансный каскад, ТК, рис. 2б). При этом нагрузкой фотодиода служит сопротивление обратной связи R_f . Верхний предел полосы частот ТК равен $(R_f * C_f)^{-1}$, значения R_f и C_f подбираются экспериментально и ограничиваются самовозбуждением усилителя. Коэффициент усиления ТК равен единице.

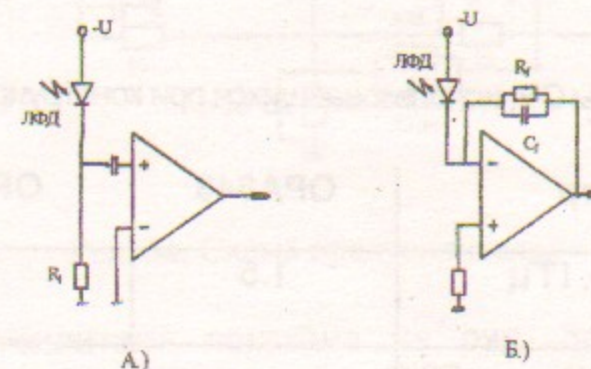


Рис.2а,б. Схемы подключения ЛФД к предусилителю.

Сравним параметры этой схемы включения ЛФД с вариантом 2а. Мы использовали операционные усилители ОРА 658, ОРА 643 фирмы Burr-Brown в оконечных каскадах и CLC425 фирмы National Semiconductor Corporation во входном каскаде усилителя (табл. 3).

Плотность токового шума входного каскада равна:

$$I_{ш} = \sqrt{i_n^2 + \left(\frac{e_n}{R_{l,f}}\right)^2 + \frac{4kT}{R_{l,f}}}$$

где $R_{l,f}$ - сопротивление нагрузки и обратной связи для первой и второй схемы соответственно. i_n - собственный токовый шум усилителя, e_n - напряжение шума ЛФД, третье слагаемое - тепловой шум сопротивления $R_{l,f}$. «Обычный» каскад на операционном усилителе ОРА643 имеет плотность токового шума $12 \text{ пА} / \sqrt{\text{Гц}}$, т.е. при сопротивлении нагрузки $R_f=200 \text{ Ом}$ и коэффициенте усиления $K_y=5$ (при больших значениях этих величин не удастся получить требуемого быстродействия детектора и широкополосности усилителя)

плотность шумового напряжения $U_{ш}=12 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Величину выходного сигнала, соответствующую таким значениям R_f и K_y , обеспечивает трансимпедансный каскад с $R_f=1\text{кОм}$. Для усилителя CLC425 величина токового шума составляет $2.6 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$ что при $R_f=1 \text{ кОм}$ дает $U_{ш}=10 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Табл.3. Параметры ОУ, использовавшихся при конструировании предусилителя.

| Параметр | ОРА643 | ОРА658 | CLC425 |
|--|--|---|---|
| Полоса усиления, ГГц | 1.5 | 0.9 | 1.9 |
| Полоса (МГц) при коэффициенте усиления | | | |
| 5 | 300 | 320 | нет данных |
| 10 | 112 | 180 | 400 |
| Шум по напряжению по току | $1.8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ $2.4 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$ | $2.6 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ $12.6 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$ | $1.05 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ $1.6 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$ |

Применение трансимпедансного каскада на входе представляется более предпочтительным, т.к. «обычный» каскад должен иметь $k. y. = 5$, что создает дополнительные проблемы при настройке усилителя, т.к. при этом суммарный коэффициент усиления равен четыремстам. Добавим, что при пониженных требованиях к полосе усиления (до 20 МГц) удастся использовать $R_f = 56 \text{ кОм}$.

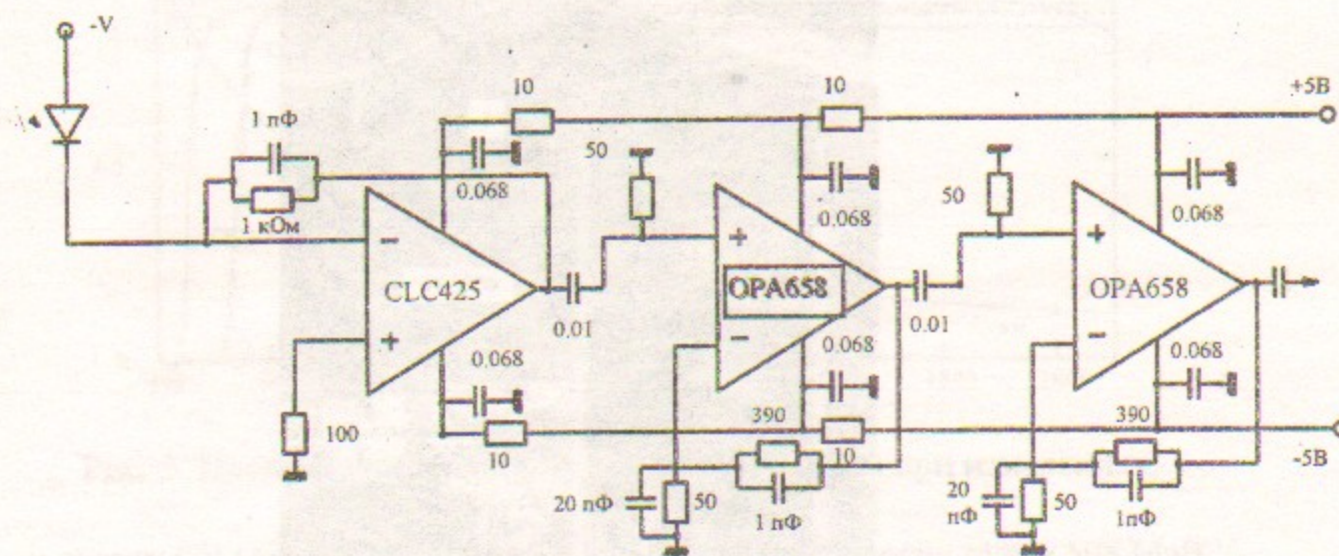


Рис. 3а. Схема предусилителя.

Схема и АЧХ предусилителя показана на рис. 3а, б. При измерениях характеристик ЛФД с помощью СИ использовался только входной каскад. Заметим, что АЧХ предусилителя оказалась весьма чувствительной к топологии печатной платы. Так, корректирующие емкости цепи обратной связи с номиналами 1 пФ были выполнены с помощью печати. В процессе настройки предусилителя выяснилось, что емкость на входе имеет паразитную отрицательную обратную связь с соседними проводниками и ее линейные размеры пришлось существенно уменьшить.

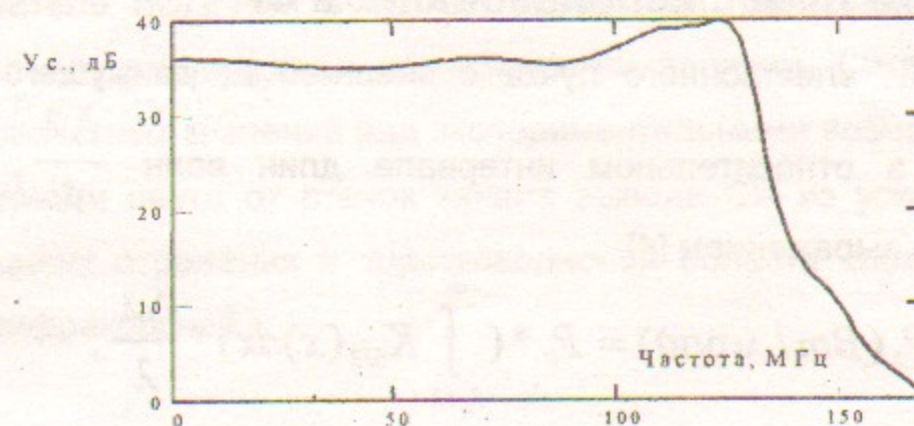


Рис 3б. АЧХ предусилителя.

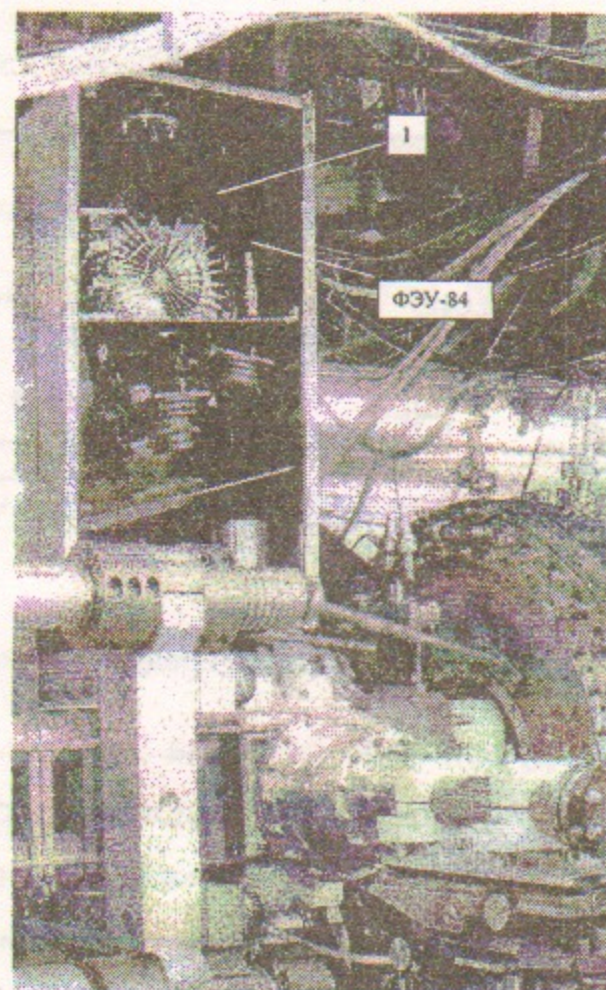


рис. 4.

На рис.4 показан 25-канальный фотодетектор (1), собранный на линейке ЛФД С30985Е, установленный в системе томсоновского рассеяния установки «ГОЛ-М».

3. Калибровка ЛФД с использованием СИ

Мощность СИ электронного пучка с энергией E , движущегося по орбите радиуса R в относительном интервале длин волн $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, приближенно описывается выражением [4]:

$$P_{\lambda}(\text{Вт/мрад}) = P_0 * \left(\int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(x) dx \right) * \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (1)$$

где $K_{5/3}(x)$ - функция Макдональда, $\lambda_c(A) = \frac{5.59R(M)}{E^3(\text{ГэВ})}$

Спектр СИ вместе с кривыми пропускания светофильтров, использовавшихся для выделения спектральных интервалов, показан на рис. 5.

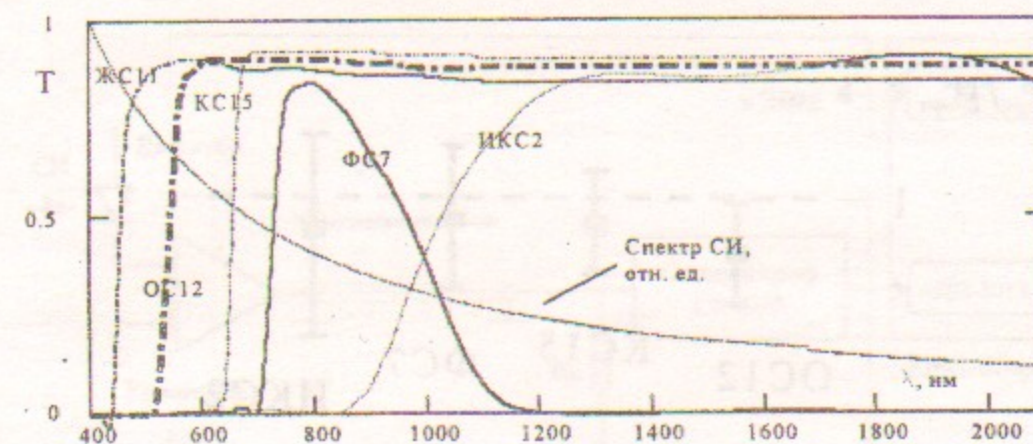


Рис. 5. Пропускание фильтров, использовавшихся при измерениях,

и спектр СИ (отн. ед.) накопителя ВЭПП-2М при энергии пучка 508 МэВ.

Абсолютные измерения мощности СИ проводились с помощью термопары и микровольтметра Ф213. Излучение фокусировалось на термопару короткофокусным объективом. Коротковолновая часть спектра обрезалась фильтром ЖС11, в сочетании с которым использовались остальные цветные стекла. Временное разрешение термопары около 1 секунды. На рис.6. показано отношение экспериментально измеренной мощности, приходящейся на участок, выделенный данным светофильтром из спектра, к рассчитанной по (1). Вычислялись отношения сигналов с термопары, зарегистрированных с данным светофильтром, к сигналу, зарегистрированному со светофильтром ЖС-11. При этом учитывался ток пучка в ускорителе ВЭПП-2М в момент измерений. Большая погрешность связана с малыми амплитудами измерявшихся величин. Систематическое превышение расчетных значений над экспериментальными возможно связано с переотражениями света от стенок канала вывода СИ из ускорителя, при этом коэффициент отражения в коротковолновой области спектра ниже по сравнению с инфракрасной.

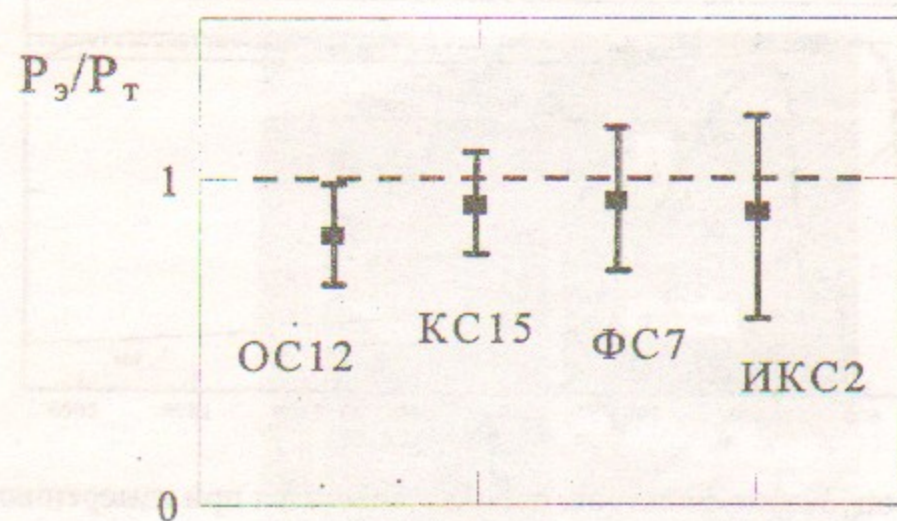
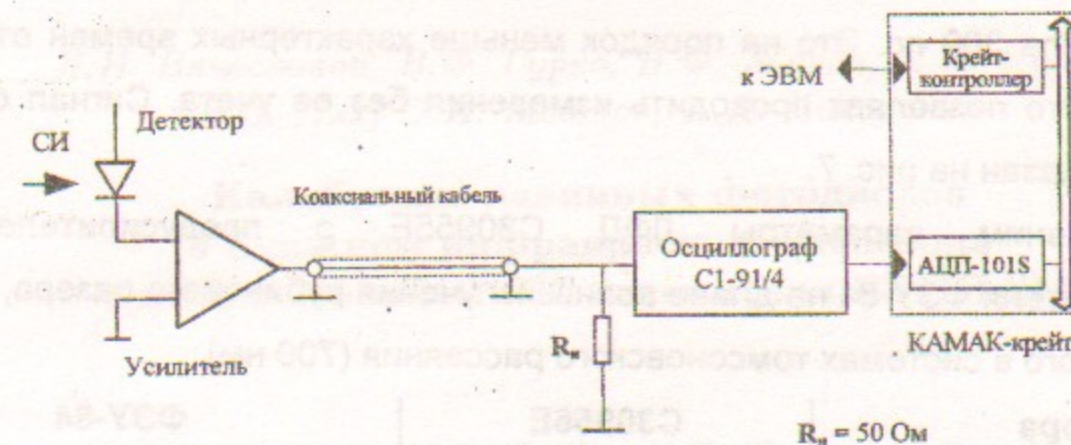


Рис. 6. Отношение измеренной доли мощности в спектре СИ к рассчитанной по (1) для разных светофильтров.

Для измерения абсолютной чувствительности ЛФД обоих типов использовались светофильтры ФС7, ИКС2 а также их сочетание. Т.к. размер одного элемента матрицы С30985Е достаточно мал, то необходимо принимать во внимание распределение мощности в фокальном пятне. Это распределение было измерено при помощи микроподвижки с шагом 0.01 мм. При расчетах вычислялась свертка кривой спектральной чувствительности ЛФД (рис.1), спектра СИ, кривых пропускания светофильтров (рис.5) и временного отклик ЛФД на сигнал СИ (рис.7). Совпадение измерений с паспортными данными для обоих ЛФД оказалось лучше 10%.

Измерения временного отклика ЛФД проводились с помощью стробоскопического осциллографа С1-91/4.

Прямая регистрация коротких импульсов с временным разрешением порядка 1 нс и лучше с технической точки зрения представляется нереальной, поэтому в данном случае используется строгая периодичность вспышек СИ и стробоскопическая техника регистрации.



Выбранная измерительная схема включает в себя коаксиальную линию для передачи сигнала с детектора, стробоскопический осциллограф С1-91/4 с полосой пропускания 18 ГГц, аналого-цифровой преобразователь АЦП-101S (диапазон входных напряжений от ± 0.08 до ± 10 В, 10 бит/диапазон, ЗУ на 4096 слов, полоса 500 Гц - 1 МГц) для оцифровки сигнала, зарегистрированного осциллографом, и крейт-контроллер КАМАК для управления АЦП и ввода данных в ЭВМ.

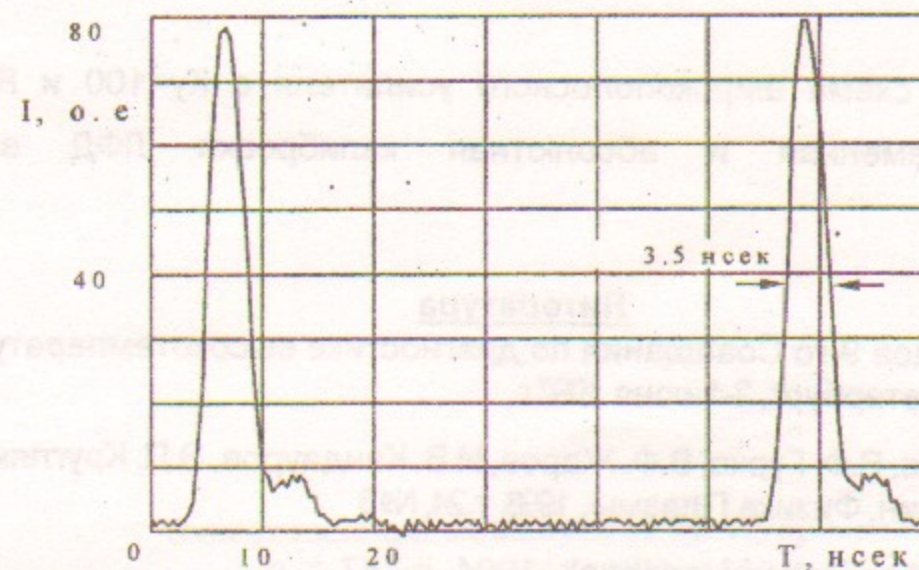


Рис.7. Отклик детектора С30985Е с широкополосным усилителем на импульс СИ накопителя ВЭПП-2М длительностью 300 пс. Измерения проводились в видимой области спектра. ЛФД С30955Е имеет аналогичные параметры.

Для определения временного распределения вспышки СИ был применен стробоскопический электронно-оптический метод с использованием диссектора. Устройство и принципы работы диссектора описаны в [5] По результатам измерений определена характерная длительность вспышки СИ.

Она составила 300 пс. Это на порядок меньше характерных времен отклика детектора, что позволяет проводить измерения без ее учета. Сигнал с ЛФД С30985Е показан на рис. 7.

Сравним параметры ЛФД С30955Е с предусилителем и фотоумножителя ФЭУ-84 на длине волны излучения рубинового лазера, часто используемого в системах томсоновского рассеяния (700 нм).

| Тип детектора | С30955Е | ФЭУ-84 |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|
| Квантовый выход | 80% | 2% |
| Чувствительность | $5 \cdot 10^6$ В/Вт ($R_f=1$ кОм) | $2-4 \cdot 10^5$ В/Вт ($R_f=50$ Ом) |
| $P_{\text{мин}}$ (соответствует сигналу 20 мВ при указанной чувствительности) | $4 \cdot 10^{-9}$ Вт | $2.5 \cdot 10^{-8}$ Вт |
| Временное разрешение | 3-4 нсек | 10 нсек |

Как видно, ЛФД в сочетании с предусилителем превосходит ФЭУ по всем параметрам в несколько раз.

4. Выводы

Разработана схема широкополосного усилителя с $K_u=100$ и $R_{вх}=1$ кОм. Проведены временная и абсолютная калибровки ЛФД вместе с предусилителем.

Литература

1. Тезисы докладов 9-го Совещания по диагностике высокотемпературной плазмы, Санкт-Петербург, 2-4 июня 1997 г.
2. Л.Н. Вячеславов, В.Ф. Гурко, В.Ф. Жаров, И.В. Кандауров, Э.П. Кругляков, О.И. Мешков, А.Л. Санин, Физика Плазмы, 1998, т.24, №3
3. Burr-Brown IC Application Handbook, 1994, p.167.
4. Г.Н. Кулипанов, А.Н. Скринский, УФН, 1977, т.122, вып.3, стр.369.
5. Э.И.Зинин. Стробоскопический метод электронно-оптической хронографии с пикосекундным разрешением на основе диссектора с электростатической фокусировкой и отклонением. Препринт 81-84, ИЯФ СО АН СССР, 1981.

*Л.Н. Вячеславов, В.Ф. Гурко, В.Ф. Жаров, К.Э. Купер,
В.В. Лях, О.И. Мешков, А.Д. Николенко*

**Калибровка лавинных фотодиодов
в ближнем инфракрасном диапазоне
с использованием СИ накопителя ВЭПП-2М**

*L.N. Vyacheslavov, V.F. Gurko, V.F. Zharov, K.Ew. Kuper,
V.V. Lyah, O.I. Meshkov, A.D. Nikolenko*

**Calibration of avalanche photodiodes
at near-IR spectral range by using
synchrotron radiation of VEPP-2M storage ring**

ИЯФ 99-25

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 18.02. 1999 г.

Сдано в набор 2.03.1999 г.

Подписано в печать 2.03.1999 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.9 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 110 экз. Бесплатно. Заказ № 25

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.