

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

3363/83

24/6-83

6-83-205

Г.А.Кононенко, Е.Т.Кондрат,  
В.М.Цупко-Ситников

АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИГНАЛА  
МИКРОФОТОМЕТРА В ВЕЛИЧИНЫ ОПТИЧЕСКОЙ  
И ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ

Направлено в сборник  
"Прикладная ядерная спектроскопия"

1983



## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Бета-спектрографы являются эффективными приборами для прецизионных измерений спектров конверсионных электронов. Высокое энергетическое разрешение  $\Delta H_p / H_p \leq 0,05\%$  обеспечивает хорошие возможности для исследования сложных спектров при изучении структуры L и M конверсионных линий, спектров электронов Оже. Однако регистрация спектров с помощью ядерных фотозмульсий создает значительные трудности при их анализе. Поэтому успех в использовании магнитных бета-спектрографов в значительной мере зависит от степени автоматизации процесса обработки спектрограмм и последующего анализа информации.

Ранее нами описаны аппаратурный <sup>1/</sup> и методика фотометрирования <sup>2/</sup>, используемые при обработке бета-спектрограмм в автоматическом режиме на линии с ЭВМ. Автоматический микрофотометр /АМФ/ значительно облегчил и ускорил процедуру обработки, позволил эффективно использовать для этой цели ЭВМ. Многократное сканирование спектрограммы по разным дорожкам с последующей фильтрацией данных и их усреднением позволяет наиболее точно и объективно рассчитать величину электронной интенсивности и оценить погрешность измерений.

Первой и наиболее трудоемкой операцией при обработке бета-спектрограмм является идентификация линий <sup>3/</sup>, то есть определение их принадлежности к соответствующему нуклиду и энергиям конкретных переходов. Идентификация осуществляется визуально по пластикам-спектрограммам или по графическому представлению спектра. Первый способ труден и неудобен из-за большой плотности информации на спектрограмме и необходимости работать с оптическими приборами-компараторами, к тому же об интенсивностях линий спектрограмм можно судить только по их качественной оценке. Удобнее пользоваться графическим представлением спектров в единицах относительной электронной интенсивности. Но такой подход требует проведения обработки спектрограмм на ЭВМ с выводом полученных спектров через графикопостроитель. Получение нескольких спектров по 8 или 16 тыс. каналов в цифровой форме и вывод такой информации на график требует большого машинного времени /несколько часов на один спектр для ЭВМ ЕС-1010/. Кроме того, для последующего детального анализа используется только небольшая часть данных. В связи с этим возникает задача найти достаточно экономичный и быстрый способ графического представления спектрограмм в электронных интенсивностях с точностью, достаточной для идентификации имеющихся в них линий.



Наиболее просто такая задача может быть решена, если графико-построитель непосредственно подключить к АМФ через аналоговое устройство, на выходе которого имеется сигнал, пропорциональный электронной плотности  $Q$ . Ранее не удавалось создать аналогичные устройства, которые обеспечивали бы приемлемую точность преобразования входных величин и имели бы незначительный дрейф характеристик. Появление новейших операционных усилителей и других аналоговых элементов в интегральном исполнении позволяет получать аналоговые преобразователи с удовлетворительными характеристиками для данной задачи.

В настоящей работе описана система для автоматического микрофотометра с шаговым приводом каретки  $1/1$ , которая в дополнение к обычному цифровому выводу информации с регистрацией в ЭВМ позволяет получать на выходе аналоговый сигнал, пропорциональный оптической или электронной плотности. Этот сигнал подается на графикопостроитель или может быть через аналого-цифровой преобразователь /АЦП/ записан в ЭВМ. Такой подход позволяет получать график спектра конверсионных электронов /или любого другого оптического объекта/ со скоростью его сканирования /до 10 мм/с/ в оптической /до  $D=5$ / или электронной плотности. Приводятся схемное решение, полученные результаты, и оцениваются погрешности методики.

## 2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Фотометрическая система АМФ построена по прямоотсчетной схеме  $1/1$ . Выходной ток регистрирующего прибора / в нашем случае фотоумножителя/ в такой системе и оптическая плотность  $D$  исследуемого объекта связаны соотношением:

$$I_{\text{ФЭУ}} = I_0 \cdot 10^{-D}, \quad /1/$$

где  $I_0$  - ток на нагрузке ФЭУ для оптической плотности  $D=0$ .

Для извлечения значения  $D$  из этого сигнала аналоговым путем это выражение достаточно прологарифмировать:  $\lg I_{\text{ФЭУ}} = \lg I_0 - D$  и сложить с током компенсации  $I_{\text{комп.}} = -\lg I_0$ . Для целей логарифмирования в аналоговых вычислительных устройствах используются усилители с логарифмической передаточной характеристикой. Широкое применение в настоящее время получают схемы логарифмических усилителей /ЛУ/, использующие нелинейность  $p-n$  перехода, включенного в цепь обратной связи операционного усилителя /ОУ/  $4/$ . Эти схемы обладают таким важным преимуществом, как простота конструкции, большой диапазон логарифмирования сигнала /до 9 декад/ и высокая точность.

Схема преобразователя приведена на рис.1.

Логарифмический усилитель выполнен на двух операционных усилителях ОУ1 и ОУ2 и транзисторной сборке Т1 по схеме, описанной

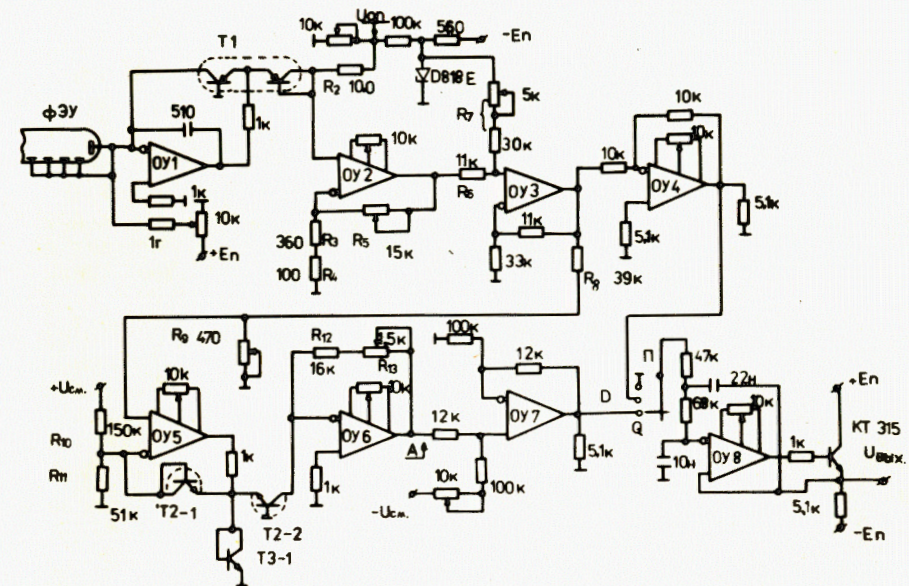


Рис.1. Принципиальная схема аналогового преобразователя: ОУ1 - К544УД1А, ОУ2 - ОУ8 - К140УД6, Т1 - К198НТ6Б, Т2 - К159НТ1В.

в работе  $5/$  с некоторыми изменениями, вызванными подключением ЛУ непосредственно к фотоумножителю. Так, из схемы был удален входной резистор  $R_1$ , транзисторная сборка взята с проводимостью  $p$ -типа /К198НТ6Б/, в качестве ОУ1 применен усилитель с полевыми транзисторами на входе /К544УД1А/ и изменена полярность опорного напряжения ( $U_{\text{оп}}$ ).

Выходное напряжение ЛУ может быть записано в виде:

$$U_{\text{вых.}} = A \cdot \lg I_0 \cdot B - A \cdot D, \quad /2/$$

где  $A$  и  $B$  - константы:  $A = \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_3 + R_4} \cdot \ln 10 \cdot \phi_T$ ,  $\phi_T = kT/e$  -

температурный потенциал / $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $e$  - заряд электрона/;  $B = R_2 / U_{\text{оп}}$  /см. рис.1/. Коэффициент  $A$  устанавливается равным единице, и для того, чтобы выделить значение "D", выходное напряжение ЛУ складывается в сумматоре /ОУ3/ с напряжением компенсации ( $U_K$ ). Резистор  $R_4$  служит для термокомпенсации схемы ЛУ. На выходе сумматора сигнал имеет отрицательную полярность и изменяется в диапазоне от 0 до -5 В, что соответствует измеряемой оптической плотности от



$D = 0$  до  $D = 5$ . На ОУ4 собран инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления  $K = -1$ .

Определение значения "электронной плотности" в соответствии с выражением

$$Q = 10^{D/C} - 1, \quad /3/$$

где  $C$  - константа, равная  $6,2^{1/8}$ , осуществляется следующим образом. Сигнал с выхода сумматора на ОУ3 делится на резисторах  $R_8 - R_9$  и через буферный усилитель /ОУ5/ с диодом сдвига уровня Т2-1 поступает на каскад с антилогарифмической передаточной характеристикой Т2-2 - ОУ6 /7/.

Зависимость напряжения на выходе ОУ6 /в точке А/ от значения  $U_{ВХ} = -D$  и параметров элементов схемы можно представить в виде:

$$U_{ВЫХ} = (A' \cdot U_{СМ} - B' \cdot U_{ВХ}) \cdot 10^{-U_{ВХ}/C'}, \quad /4/$$

где

$$A' = \frac{R_{12} + R_{13}}{R_{10}}, \quad B' = \frac{R_9 (R_{12} + R_{13})(R_{10} + R_{11})}{R_{10} R_{11} (R_8 + R_9)},$$

$$C' = \frac{\phi_T \ln 10 (R_8 + R_9)}{R_9}.$$

Значение  $C'$  устанавливается потенциометром  $R_9$ . Коэффициент  $A' \cdot U_{СМ}$  выбирается близким к единице / $\approx 0,99$ /, тогда для данного  $U_{СМ} /+9$  В/ определяется значение  $R_K = R_{12} + R_{13} /16,65$  кОм/. Коэффициент  $B'$  для указанных номиналов резисторов будет иметь значение, равное  $\approx 0,004$ , и, таким образом, для максимального  $U_{ВХ} = -5$  В / $D = 5$ / этот член в выражении /4/ будет равен  $\approx 0,02 \ll 1$ , что дает максимальную ошибку в расчёте функции  $10^{-D/C}$ , равную 1%. Для вычисления единицы это напряжение складывается в сумматоре с отрицательным напряжением  $-U_{СМ}$  /и в результате на выходе /ОУ7/ формируется напряжение, соответствующее выражению /3/.

Сигнал, равный измеряемой оптической плотности  $D$  /выход ОУ4/ или значению "Q" /выход ОУ7/ через переключатель "П" подается на активный фильтр /АФ/ с частотой среза  $f_{ср} = 200$  Гц. С выхода АФ сигнал может быть подан на У-вход графопостроителя или при записи в ЭВМ на АЦП /1/.

Для привода X-координаты графопостроителя имеется ЦАП на 1024 канала, управляемый импульсами от устройства управления шагового привода АМФ /1/. Нами использован двухкоординатный самописец планшетного типа Н-306 с рабочим полем  $200 \times 300$  мм. Динамический диапазон приставки при измерении оптической плотности составляет  $0 \div 5$  единиц  $D$  и  $0-5,4$  единиц  $Q$  /выражение 3/.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Систематические ошибки в определении  $D$  и  $Q$  в виде относительного отклонения /в процентах/ величин  $D(Q)$ , рассчитанных преобразователем, от истинных  $D_{и}(Q_{и})$ , представлены на рис.2.  $D_{и}(Q_{и})$  определялись расчетно для соответствующих потенциалов, задаваемых на входе аналогового преобразователя. Как видно, систематические ошибки / $\epsilon_D$  %,  $\epsilon_Q$  %/ для диапазона  $D$  от 0,1 до 5 и  $Q$  от 0,04 до 5 не превышают 3%. На этом же рисунке /кривая 3/ приведены относительные отклонения от истинных значений электронной плотности  $Q_{и}$  величин  $Q_1$ , рассчитанных программным путем при обычно используемой цифровой обработке спектрограмм по описанной ранее методике /2/. Величины  $Q_1$  при этом определяются согласно выражению:

$$Q_1 = \left( \frac{\bar{U}_0 - \bar{U}_П}{\bar{U}_1 - U_П} \right)^{1/C} - 1, \quad /5/$$

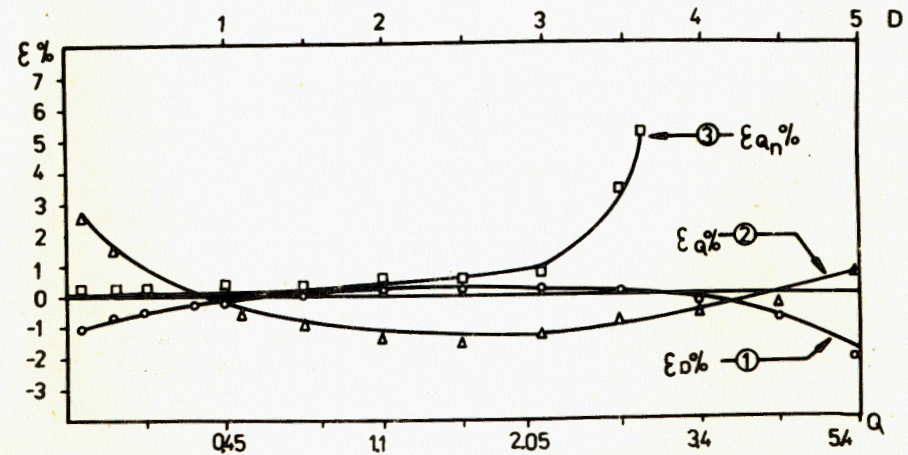


Рис.2. Относительные погрешности аналогового расчета величин оптической  $D_A$  и электронной плотности  $Q_A$ :

$$1 - \epsilon_D \% = \frac{D_A - D_{и}}{D_{и}} \cdot 100\%, \quad 2 - \epsilon_Q \% = \frac{Q_A - Q_{и}}{Q_{и}} \cdot 100\%, \quad 3 -$$

относительная погрешность программного расчета оптической плотности.



где  $\bar{U}_n$  - значение напряжения пьедестала /50 мВ/, которое вводится для устранения влияния нелинейности АЦП в начальных каналах,  $\bar{U}_i$  - текущее значение напряжения ФЭУ,  $\bar{U}_0$  - максимальное значение напряжения на входе АЦП, для которого относительная оптическая плотность принимается равной нулю. Значения  $\bar{U}_0$ ,  $\bar{U}_n$  и  $\bar{U}_i$  представляют собой усредненные значения, полученные в результате многократного /10 раз/ фотометрирования спектрограммы <sup>/2/</sup>.

Как видно из рисунка, такой подход дает значительные отклонения для  $D > 3,5$ . Это возрастание ошибки обусловлено шумами, главным образом, фотослоя <sup>/2/</sup>, которые кроме флуктуационной ошибки при небольшой статистике измерений могут создавать некоторую систематическую ошибку, обусловленную смещением значений напряжений, входящих в выражение /4/. Причем смещение значений  $\bar{U}_i$  оказывает влияние на результат лишь для данной точки, а неточность определения  $\bar{U}_n$  будет оказывать влияние на все рассчитываемые точки, и тем большее, чем больше измеряемое значение  $D(Q)$ .

Таким образом, аналоговая приставка выгодно отличается при фотометрировании спектрограмм, имеющих значительный фон или сильные линии. Точность аналогового расчета не только вполне достаточна для вывода спектра на графопостроитель с целью идентификации линий, но приставка вполне может быть использована при систематической обработке спектрограмм, для чего ее выход должен быть подан на АЦП с целью записи информации в ЭВМ. При необходимости получаемые результаты могут быть скорректированы с учетом имеющейся небольшой систематической погрешности преобразования.

Результаты сравнительного фотометрирования ряда фотопластиков двумя описанными способами показали хорошее совпадение величин  $Q$  /брались максимумы интенсивностей ряда линий/ в пределах ошибок измерений. Часть результатов приведена в таблице.

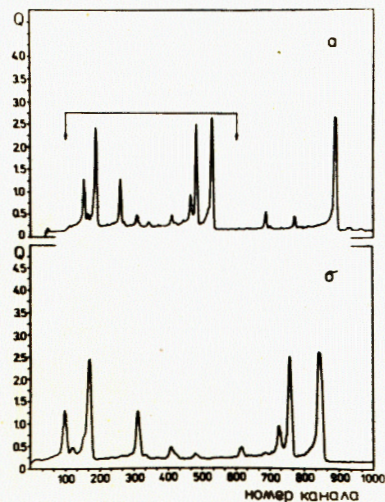


Рис.3. Участок спектра конверсионных электронов, вычерченный графопостроителем: а/ - шаг фотометрирования 50 мкм, б/ - участок, выделенный стрелками на верхнем рисунке и пройденный с шагом 25 мкм.

Таблица

Аналого- вое опре- деление	1,393	0,734	0,316	1,106	0,356	2,481	0,682
$Q_a \pm \sigma_a$	$\pm 0,018$	$\pm 0,01$	$\pm 0,05$	$\pm 0,017$	$\pm 0,002$	$\pm 0,005$	$\pm 0,006$
Расчет	1,417	0,759	0,320	1,133	0,364	2,380	0,685
$Q_n \pm \sigma_n$	$\pm 0,040$	$\pm 0,018$	$\pm 0,012$	$\pm 0,029$	$\pm 0,007$	$\pm 0,141$	$\pm 0,015$

На рис.3 в качестве иллюстрации представлены участки спектра конверсионных электронов, вычерченные графопостроителем с использованием аналогового преобразователя.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дополнение автоматического микрофотометра аналоговым преобразователем позволило решить несколько задач:

1. Стало возможным быстрое, в процессе сканирования спектрограммы, получение в аналоговой форме спектра конверсионных электронов в оптической или электронной плотности и вывод его на график без участия ЭВМ. При этом точность получаемой информации не только достаточна для идентификации линий спектра, но и для дальнейшей обработки спектра с помощью ЭВМ. Скорость получения графика определяется только возможностями используемого графопостроителя.

2. Аналоговый преобразователь позволил расширить диапазон измеряемых оптических плотностей до  $D = 5$  с точностью не хуже 3%.

3. При использовании аналогового преобразователя для последующей обработки спектрограмм в цифровой форме на ЭВМ на 30 ÷ 40% сокращается машинное время, необходимое для получения спектра в усредненных значениях  $D$  и  $Q$  с расчетом значений погрешности  $\sigma_Q$  в каждой точке.

4. Возможно, в отличие от ранее использованного метода, фотометрирование и обработка спектрограмм по отдельным участкам.

Таким образом, добавление аналогового преобразователя к АМФ расширило возможности по предварительному анализу и обработке спектрограмм и других оптических объектов и позволяет получать информацию с достаточной точностью при помощи очень простых технических средств.

Авторы благодарны В.Г.Зинову за полезные обсуждения и предложения, сделанные в процессе разработки прибора.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Исламов Т.А. и др. ОИЯИ, Р10-12794, Дубна, 1979.
2. Абдуразаков А.А. и др. ОИЯИ, Р6-81-696, Дубна, 1981.
3. Абдуразаков А.А., Громов К.Я., Умаров Г.Я. Бета-спектрографы с постоянными магнитами. "ФАН", Ташкент, 1970.
4. Gibbons J.E., Horn H.S. A circuit with logarithmic transfer response over 9 decades, IEEE Trans., 1964, V CT-11, Sept., No.3, p. 370-384.
5. ELECTRONIC DESIGN 4, 15, 1973, p. 60.
6. Тезисы докладов XXX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Ленинград, 18-21 марта, 1980, Л., "Наука", 1980, с. 552.
7. Шило В.Л. Линейные интегральные схемы. "Советское радио", М., 1979, с. 171-178.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 апреля 1983 года.

Кононенко Г.А., Кондрат Е.Т., Цупко-Ситников В.М. 6-83-205  
Аналоговый преобразователь сигнала микрофотометра в величины  
оптической и электронной плотности

Для обработки оптических объектов и, в частности, бета-спектрограмм, получаемых на магнитных спектрографах, разработано устройство аналогового преобразования сигнала микрофотометра в величины оптической (D) и электронной (Q) плотности. Устройство собрано на 8 операционных усилителях и двух транзисторных микросборках и подключено непосредственно к фотоумножителю микрофотометра. Динамический диапазон измеряемых оптических плотностей составляет 5 единиц. Ошибка преобразования — не более 3%. Преобразователь используется для ввода информации о спектре в ЭВМ и для оперативного получения графика спектра в единицах D или Q на графопостроителе, непосредственно подключенном к микрофотометру. Применение преобразователя позволило расширить динамический диапазон измеряемых микрофотометром плотностей от 3 до 5 единиц, сократить машинное время на предварительную обработку спектра на 40%.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Kononenko G.A., Kondrat E.T., Tsupko-Sitnikov V.M. 6-83-205  
Analog Transformer of Microphotometer Signal into Optical  
and Electron Density Values

The device for analog calculation of optical (D) and electron (Q) density is described. It is used for treatment of the  $\beta$ -spectrograms from magnetic spectrographs and other optical objects. The unit consists of 8 operational amplifiers and two silicon transistor microassemblies. Dynamic range of the device is up to 5 decades. The performance error is not more than 3%. The units is used for registering the information spectrum in the D or Q units. It allows one to increase the dynamic range of the optical density, measured by the automatic photometer, from 3 to 5 units, to diminish computer time for the preliminary treatment of optical spectra by over 40%, and made it possible to treat  $\beta$ -spectrograms by separate sections.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.