

туров, взаимодействующих с частицами пучка и радиально-расположенными относительно оси последнего (рис. 2) в виде нескольких секций.

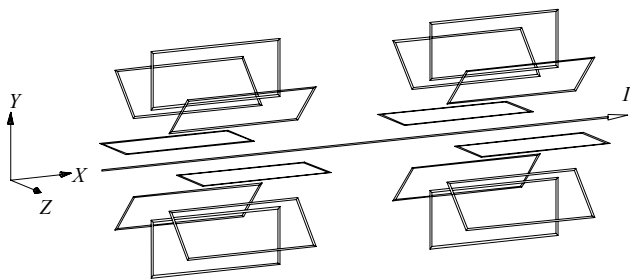


Рис. 2. Пример расположения двух охлаждающих секций относительно оси пучка

Тем самым часть ионопровода ускорителя длиной ~1 м обеспечивает необходимую диссипативную потерю энергии ускоряемых частиц любой массы. Величина потерь энергии каждой частицы зависит от расстояния  $b$  между ее траекторией и осью “диссипативных секций” и пропорциональна квадрату величины  $U$ , наводимой пучком на сопротивлении  $R$  и вычисляемой из (1). Это обуславливает “перемешивание” охлаждаемого пучка и уменьшение его диаметра.

Отметим также, что регулировка величины диссипативных сил, аналогичных обычному трению и направленных против скорости каждой частицы, легко регулируется нагрузочными сопро-

тивлениями  $R$  в цепи каждого проволочного контура и может регулироваться управляющим потенциалом, подаваемым на смещение транзисторов, которые можно использовать вместо нагрузочного сопротивления.

Идея экспериментально апробировалась на трех макетах, в которых пучок имитировался проводником. Геометрия нагрузочных секций этих макетов была подобна геометрии секций, изображенных на рис. 2, и различалась величиной сопротивлений  $R$ . Во всех случаях наблюдалось выделение энергии на этих сопротивлениях.

Следует отметить, что обсуждаемая в настоящей статье схема охлаждения пучков ускоряемых частиц допускает несколько вариантов использования для этой цели таких контуров, индуктивно связанных с пучком частиц и обуславливающих их диссипативные потери. Обсуждение этих вариантов целесообразно вести несколько позднее.

Таким образом, описан сравнительно простой способ охлаждения частиц любой массы и приведены доводы в пользу его работоспособности.

**Л и т е р а т у р а**

1. Коломенский А. А., Лебедев А. Н. Теория циклических ускорителей. — М.: Физматгиз, 1962.
2. Будкер Г. И., Скринский А. И.// УФН. 1978. Т. 124. Вып. 4. С. 561.
3. С. ван дер Меер // Там же. 1985. Т. 147. Вып. 2. С. 405.

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2006 г.

**On the cooling of particles’ bunches**

*E. V. Mayorov*

Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences Moscow, Russia

*V. V. Okorokov*

Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, Russian Federation State scientific center, Moscow, Russia

*The method of cooling of bunches of accelerated particles of any mass is presented in this article.*

УДК 621.383.734: 621.9.048.7

**Влияние электронно-лучевой обработки на параметры фотоэмитирующих структур и фактор шума МКП**

*С. П. Авдеев, А. А. Кравченко, Е. Ю. Гусев*

Таганрогский государственный радиотехнический университет, г. Таганрог, Россия

*Представлены результаты влияния электронно-лучевой обработки (ЭЛО) на параметры и характеристики многощелочных и бищелочных фотокатодов (ФК) вакуумных фото-*

*электронных приборов и электронно-лучевой модификации каналов усиления микроканального пространственного усилителя (МКП) электронно-оптического преобразователя (ЭОП). ЭЛО повышает среднюю интегральную чувствительность на 10—12 % и снижает брак в производстве изделий по ФК в 4 раза. ЭЛО МКП до операции восстановления снижает фактор шума пространственного усилителя в 1,5—2,0 раза; повышается чувствительность ЭОП.*

Непременным условием для формирования качественных фотоэмитирующих и эмиссионных структур электрооптических устройств является состояние поверхности подложки, которая зависит от методов ее подготовки, длительности проведения процесса, среды и многих других технологических факторов. Применяемая в производстве электронных приборов механическая полировка оставляет развитый нарушенный слой поверхности подложки, состоящий из слоев: рельефно-аморфного, трещиноватого и дислокаций.

Формирование фотоэмиссионных, эпитаксиальных и других структур на такой поверхности крайне затруднительно, так как несовершенство последней копируется в формируемые структуры, а остаточная среда в трещинах поверхностного слоя изменяет характеристики активных структур прибора во время их формирования и в процессе эксплуатации прибора [1, 2].

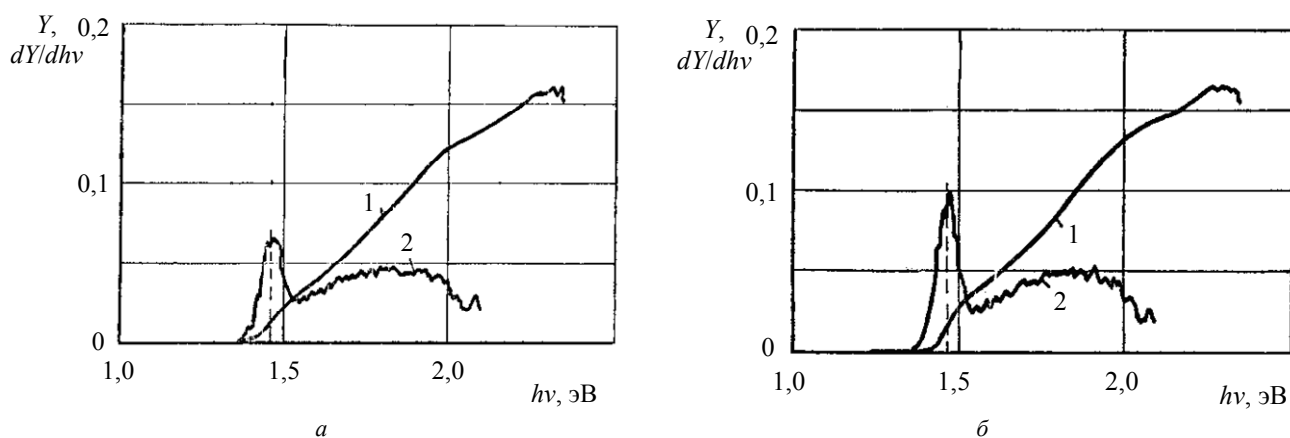
В настоящее время проявляется интерес к нетрадиционным методам подготовки поверхности, таким как плазменная полировка, ионное травление и структурирование, лазерная и электронно-лучевая обработка. Относительно традиционных механохимических процессов эти методы привлекательны комплексным решением задач создания бездефектной, атомарно-гладкой поверхности. С точки зрения технологичности, из перечисленных выше методов стоит выделить последние два. Обработка электронным лучом инициирует на по-

верхности подложки процессы, течение которых переводит поверхность в новое, более равновесное термодинамическое состояние. Например, ЭЛО дефектного слоя на поверхности оптических стекол сканирующим электронным лучом позволила получить предельно гладкие и чистые поверхности [3].

### Результаты и обсуждения

Для исследования характеристик мульти- и бищелочных фотокатодов, формируемых на поверхности оптического стекла, применялись катодные колбы фотокатода, подготовленные по методу обычной механической полировки и после ЭЛО. Анализ свойств мультищелочного фотокатода (МФК) типа Na—K—Sb—Cs и бищелочного (БФК) K—Sb—Cs усложнялся тем, что тонкие поликристаллические пленки антимоидов щелочных металлов существуют только в вакууме, поэтому в работе исключались прямые методы исследования строения и зонной структуры фотокатодов, основные параметры которых были получены методами оптической спектроскопии.

При исследовании фотоэмиссионных спектров МФК методом дифференциальной спектроскопии (рис. 1) было замечено, что на подложке с ЭЛО фотоэмиссия на 10—12 % больше ФК, сформированного на механически полированной подложке, а квантовый выход возрос в 1,5 раза.



**Рис. 1. Дифференциальные спектры фотоэмиссии МФК типа  $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ : а — механически полированная поверхность; б — поверхность после ЭЛО; 1 —  $Y$ -фотоэмиссия; 2 —  $dY/dhv$ -квантовый выход ФК**

Спектральная характеристика ФК, в особенности в длинноволновой области, наиболее чувствительна к технологии изготовления и состоянию поверхности. Поэтому для выявления влияния ЭЛО на параметры ФК проводилась статистическая обработка большой партии катодных колб. В результате статистической обработки установлено, что ЭЛО поверхности стеклянных подложек изменяет характер распределения интегральной чувствительности ФК.

Средняя величина интегральной чувствительности возрастает на 8—10 % (с 218 до 235 мкА/лм), причем брак по этому параметру снижается в 2—3 раза.

Средняя величина интегральной чувствительности в красной области спектра повышается на 10—12 % (с 102 до 114 мкА/лм), брак по этому параметру снижался на 10 %.

Аналогичным образом наблюдалось повышение чувствительности в инфракрасной области спектра на 6 %.

При исследовании влияния состояния поверхности подложки на параметры ФК необходимо обеспечить идентичные технологические условия их формирования или осуществить формирование ФК в одном вакуумном объеме в едином технологическом цикле. Для этого подложка катодной колбы обрабатывается электронным лучом частично, т. е. одна половина подложки с механической полировкой, другая — с ЭЛО. Сформированный на такой поверхности БФК уже визуально различался половинками сформированных структур (рис. 2).

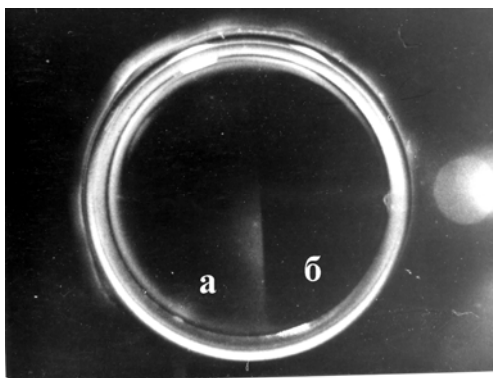


Рис. 2. Изменение структуры БФК типа  $K_2SbCs$  при изготовлении в одном вакуумном объеме и технологическом цикле:

а — механически полированная поверхность; б — после ЭЛО

Для каждой из половинок ФК были сняты оптические спектры пропускания, отражения и поглощения, а также кривые спектральной чувствительности (рис. 3). Оказалось, что спектр оптического пропускания практически не изменяется. Это очевидно, так как формирование ФК обычно

контролируется по изменению коэффициента пропускания [4]. Увеличение коэффициента отражения на половине ФК с ЭЛО может быть вызвано изменением параметров тонкопленочного ФК как оптической системы [5].

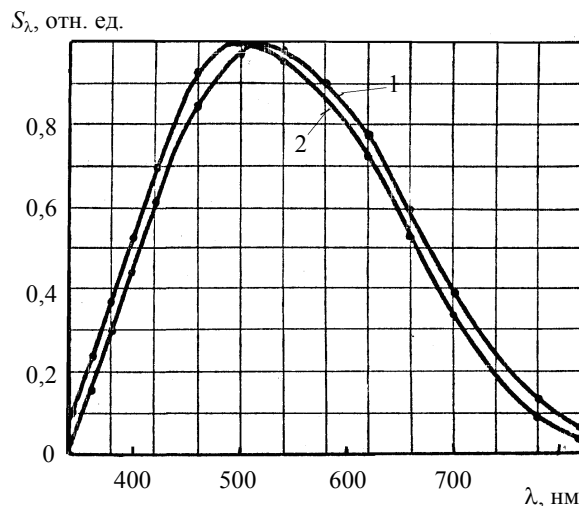


Рис. 3. Спектральная характеристика БФК типа  $K-Sb-Cs$ :

1 — половинка подложки с механической полировкой; 2 — ЭЛО поверхности.

Спектральная чувствительность БФК, как видно из рис. 3, после ЭЛО имеет сдвиг кривой в синюю область спектра, что объясняется уменьшением толщины структуры ФК на 10—12 %, т. е. порядка 10 нм [5]. Таким образом, несмотря на снижение толщины ФК на половинке подложки с ЭЛО изменений в спектрах пропускания практически не обнаружено. Увеличение светового отражения, уменьшение толщины структуры и сохранение высоких значений спектральной характеристики свидетельствуют об упорядочении и совершенстве структуры ФК.

В электронно-оптическом преобразователе МКП определяет такие параметры прибора, как усиление, разрешение и шум. Проблема собственных шумов МКП остро сказывается в приборах ночного видения, усилителях слабого сигнала и других подобных приборах.

Динамический шум МКП зависит от дисперсии коэффициента усиления, величины коэффициента вторичной электронной эмиссии первого удара и эффективной площади каналов

$$F = \frac{1}{\gamma} \left( 1 + \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1 + G/\sigma_1}{G} \right), \quad (1)$$

где  $F$  — фактор шума МКП;

$\gamma$  — эффективная площадь каналов;

$\sigma_1$  — коэффициент вторичной эмиссии первого удара;

$G$  — коэффициент усиления [6].

Из формулы (1) видно, что при типовых значениях коэффициента усиления МКП  $G = 10^4$  предельное значение фактора шума можно найти из выражения

$$F = \frac{1}{\gamma} \left( 1 + \frac{2}{\sigma_1} \right).$$

Одним из основных свойств ЭЛО МКП является увеличение эффективной площади входов каналов. Результирующая структура поверхностного слоя (ПС) МКП формируется путем одновременного протекания трех взаимосвязанных физических процессов: нагрева поверхности, плавления ее на глубину порядка 2 мкм и капиллярного течения материала в зоне с пониженной вязкостью, который формирует конусообразную форму входа канала. Сформированная таким образом структура фиксируется после ухода луча.

Черты обработанной и необработанной поверхностей проявляются в периодически повторяющихся возвышениях высотой до 3 мкм. С помощью короткофокусного микроскопа при изучении торцов каналов была получена поверхность МКП, отражающая степень раскрытия входа канала и ее видоизменение (рис. 4). Формирование на поверхности вида сотовой структуры (см. рис. 4, б) после ЭЛО является характерным свойством для всех МКП с оплавлением их на глубину приблизительно 1—2 мкм.

Установлено, что в результате электронного облучения изменяется химический состав ПС

МКП. Оже-спектроскопия поверхности показала, что содержание углерода снижается после ЭЛО в два раза, удаляются из модифицированного слоя щелочные модификаторы, разорванные связи кислорода с кремнием восстанавливаются, в результате структура поверхности преобразуется к структуре, близкой к структуре плавленного кварца. Наблюдается изменение концентрационных профилей бария, натрия, калия и свинца: содержание натрия снижалось на 35—38 %, а калия — на 25—27 %. Происходит существенное освобождение поверхности от свинца. Такое превращение химического состава поверхности каналов позволило увеличить коэффициент вторично-электронной эмиссии первого соударения в среднем на 10 % (табл. 1).

Исследования МКП после ЭЛО на шумовые характеристики показали, что обработанные электронным лучом МКП имели по сравнению с серийными пластинами достаточно низкий фактор шума. Однако анализ зависимостей  $I_{out} = f(I_{in})$  показал, что в определенной степени наблюдаемое снижение может быть обусловлено нелинейностью этой характеристики. Поэтому измерения фактора шума были повторены при малых входных токах ( $I_{in} = 6 \cdot 10^{-12}$  А). В этом случае значение фактора шума возросло, но осталось ниже, чем для контрольной группы пластин. Результаты измерений представлены в табл. 2.

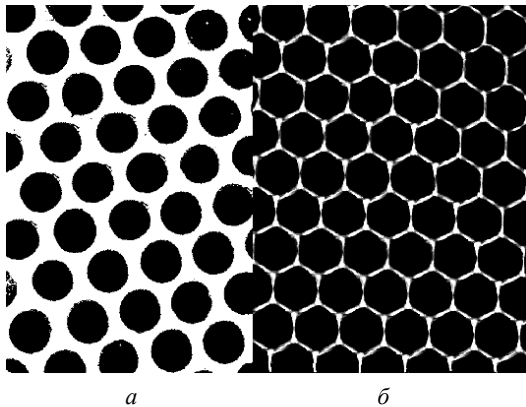


Рис. 4. Вид поверхности МКП до (а) и после ЭЛО (б)

Таблица 1

Значения зависимости  $\sigma = f(E)$  для стекла 6Ва4 и модели канала МКП до и после ЭЛО

№	Тип образца	Тип поверхности	$\sigma_m$	$E_{p_m}$ , эВ	$E_{p_2}$ , кэВ
1	Стекло 6Ва4		3,25	390	3,45
		ЭЛО	3,3	320	3,14
2	Модель канала МКП		3,2	400	3,10
		ЭЛО	3,7	370	2,60
3	Модель канала МКП, отожженная в $H_2$		3,3	420	2,44
		ЭЛО	3,7	340	2,34
4	Стекло 6Ва4, отожженное в водороде до ЭЛО		3,5	350	2,9
		ЭЛО	3,9	340	2,5

Таблица 2

Значения фактора шума МКП до и после ЭЛО

Номер образца	Фактор шума $F$ при $I_{in} = 3-9 \cdot 10^{-11}$ А	Среднее значение $F$	Фактор шума $F$ при $I_{in} = 6 \cdot 10^{-12}$ А	Среднее значение $F$	Примечание
1	1,8		3,0		Поверхность МКП, подготовленная электронным лучом
2	1,6		3,0		
3	1,8	1,8	2,9	2,3	
4	1,8		3,2		
5	2,1		2,4		
6	1,7		2,2		
7	3,0		4,0		Серийно изготавливаемые МКП
8	4,8	3,9	5,0	4,5	
9	3,9		4,5		
10	3,9		4,5		

Снятые усилительные характеристики пластин из группы, представленной в табл. 2, наглядно показывают, что усилительные характеристики МКП с ЭЛО идут выше серийных МКП (рис. 5). Правда, такое небольшое увеличение коэффициента усиления в целом не даст заметного повышения усилительных свойств электронно-оптического преобразователя.

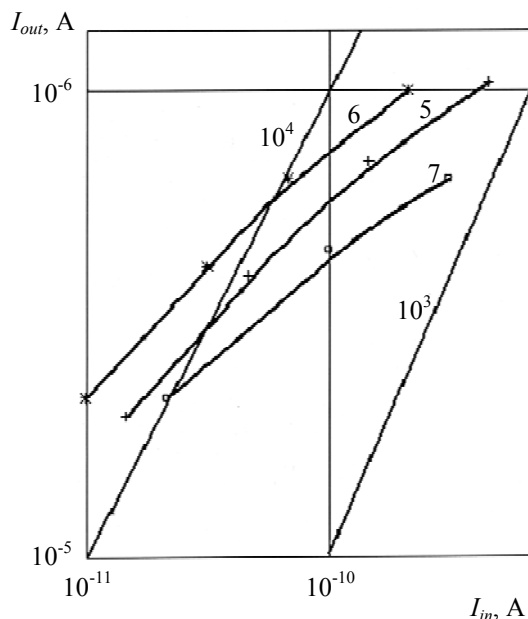


Рис. 5. Усилительные характеристики МКП: 5, 6 — кривые сняты с МКП после ЭЛО; 7 — кривая серийной МКП

Полученные экспериментальные результаты в полной мере подтверждают снижение шума в канальном усилителе путем ЭЛО входной поверхности МКП до операции восстановления благодаря улучшению условий отбора фотоэлектронов в каналы, изменению элементного состава поверхностного слоя МКП, повышению величины эмиссии

поверхности первого удара и удалению адсорбированных на поверхности МКП-загрязнений.

### Заключение

В ходе выполнения работы удалось установить существенное влияние микрорельефа и химической структуры ФК на его эффективность. Обработывались катодные колбы (ФК типа Na—K—Sb—Cs) с технологической металлизацией. Результаты такой обработки показали следующее: средняя величина чувствительности увеличивается на 15—20 %; в 2—3 раза увеличивается число приборов с предельной величиной чувствительности; увеличивается число приборов с повышенной чувствительностью в ИК-области спектра; максимум спектральной характеристики чувствительности (для ФК типа K<sub>2</sub>—Sb—Cs) сдвигается в сильную область.

Электронно-лучевая обработка МКП позволила изменить микрогеометрию входной поверхности пластины и элементный состав поверхностного слоя, тем самым повысить коэффициент вторичной электронной эмиссии первого удара, что привело к снижению фактора шума — одного из важных параметров МКП и электронно-оптического прибора в целом. Установлено, что фактор шума МКП, подвергнутых ЭЛО до операции восстановления МКП, снижается в 1,5—2,0 раза, одновременно незначительно растет коэффициент усиления.

### Литература

1. Степанчук В. М., Лазорина В. Н., Сорока В. В. // ФХОМ. 1984. № 4. С. 123—127.
2. Запорожский В. П., Лапинов Б. А. Обработка полупроводниковых материалов. — М.: Высш. шк., 1989.
3. Dudko G. V., Kravchenko A. A., Cherednichenko D. I. // J. Non-Crystalling Solid. 1995. V. 188. P. 87—95.

4. Соммер А. Фотоэмиссионные материалы. — М.: Энергия, 1973.

5. Кондрашов В. Е. Оптика фотокатодов. — М.: Наука, 1976.

6. Feller W. B., Cook L. M., Fraser G. W., Pearson J. F., Murray S. S., Garcia M. R. // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1989. V. 1072. P. 138—148.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## Electron-beam processing effect on photoemitting-structures parameters and the noise factor of microchannel plates

S. P. Avdeev, A. A. Kravchenko, E. J. Gusev

Taganrog State University of Radio Engineering, Taganrog, Russia

*This paper presents investigation findings of electron-beam influence on parameters and characteristics of trialcali and bialkali photocathodes of vacuum photoelectric devices and electron-beam amplification channels modification of microchannel plate image intensifier (MCP) of the electrooptical transducer. The electron-beam processing (EBP) increases total sensitivity by 10—12 % and reduces spoilage in photocathode production to a fourth. The noise factor of MCP subjected EBP before recovery procedure MCP, reduces in 1.5—2.0 times, the sensibility of electrooptical transducer increases.*

\* \* \*