

УДК 520.344

PACS: 03.65 Ta

Электронно-оптический преобразователь изображения с автоэмиссионным фотокатодом

И. С. Гибин, П. Е. Котляр

Проведен анализ электронно-оптических преобразователей (ЭОП). Отмечена тенденция, направленная на расширение их рабочего спектрального диапазона в область инфракрасного излучения и повышение чувствительности. Расширение длинноволновой границы спектральной чувствительности ЭОП с одновременным повышением чувствительности возможно с применением автоэмиссионных катодов, обладающих уникальными эмиссионными характеристиками. В статье предлагается ЭОП с автоэмиссионным фотокатодом. Разработана конструкция такого преобразователя, рассмотрены режимы работы и проведены оценки чувствительности и спектрального диапазона. Отмечается, что разработка и создание ЭОП с автоэмиссионными фотокатодами, работающими в инфракрасном диапазоне, является важным этапом в развитии инфракрасной техники.

Ключевые слова: электронно-оптический преобразователь, автоэмиссионный фотокатод, инфракрасное излучение, пироэлектрическая матрица, прибор ночного видения, тепловидение.

Ссылка: Гибин И. С., Котляр П. Е. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 31.

Reference: I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Prikl. Fiz., No. 3, 31 (2019).

Введение

Значительное улучшение технических характеристик электронно-оптических преобразователей (ЭОП) в последние десятилетия было достигнуто за счет повышения чувствительности по отношению к уровню принимаемого сигнала и расширению их рабочего частотного диапазона в область инфракрасного излучения. С этой целью проводились иссле-

дования по улучшению эмиссионных свойств катодов (источников первичного потока электронов), характеристик усилителей и умножителей количества электронов и их миниатюризация, применение в ЭОП широкополосных пироэлектрических элементов для управления потоком электронов, формирующих изображения в двумерных регистрирующих устройствах. В настоящее время традиционные фотокатоды на основе GaAs, применяемые в ЭОП III поколения, работают в области спектра 0,4–0,9 мкм. За последние годы созданы фотокатоды с отрицательным электронным сродством на основе структуры InGaAs–InGaAsP, работающие в области спектра 0,4–1,1 мкм. Достигнутые значения чувствительности многощелочного и арсенидгаллиевого фотокатодов близки к теоретически предельным значениям, и дальнейшее улучшение параметров ЭОП и приборов ночного видения (ПНВ) за счет повышения чувствительности фотокатода практически невозможно. Улучшение параметров ПНВ возможно за

Гибин Игорь Сергеевич^{1,2}, гл.н.с., д.т.н., профессор.
Котляр Петр Ефимович¹, вед. инженер, д.г.-м.н., профессор.

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН.
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика
Коптюга, 1.

Тел.: 8(913) 464-27-06, 8(903) 935-16-31.

² Новосибирский государственный технический
университет.

Россия, 630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20.
E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

Статья поступила в редакцию 6 мая 2019 г.

© Гибин И. С., Котляр П. Е., 2019

счет расширения диапазона чувствительности в ближнюю ИК-область спектра [1]. Актуальной проблемой остается создание фотокатодов с рабочей областью спектра, смещенной в диапазон 1,4–1,8 мкм, так как здесь обеспечивается возможность наблюдения объектов в атмосферных аэрозолях и дымах, а также обнаружения излучения современных лазерных целеуказателей-дальномеров, работающих на длинах волн 1,55 мкм и 1,7 мкм.

Целью данной работы является предварительный анализ основных тенденций развития ЭОП для ИК-диапазона и представление на этой основе разработки малогабаритного неохлаждаемого преобразователя изображения в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне в изображения в видимом диапазоне или в электрический сигнал на базе классического электронно-оптического преобразователя, в котором устраняются отмеченные при анализе недостатки известных конструктивных решений ЭОП.

Анализ и постановка работы

Во всех существующих конструкциях электронно-оптических преобразователей изображения для генерации первичного электронного потока в катодах используется явление фотоэлектронной эмиссии. Какая-либо информация об использовании в ЭОП автоэлектронной эмиссии авторам не известна. В то же время современные автоэмиссионные катоды обладают уникальными эмиссионными характеристиками [9].

Эта уникальность обусловлена во-первых тем, что среди эмиссионных явлений автоэмиссия занимает особое место, так как это чисто квантовый туннельный эффект, при котором для высвобождения электронов из катода не требуется затрат энергии на сам эмиссионный акт в отличие от термо-, фото- и вторичной эмиссии [10]. Для анализа эмиссионных характеристик автоэлектронных эмиттеров обычно используют теорию Фаулера-Нордгейма [10]. Теория и эксперимент показывают, что для получения заметного автоэмиссионного тока необходимо существование вблизи поверхности автоэлектронного эмиттера очень сильного электрического поля $E = (3-4) \times 10^7$ В/см.

Во-вторых, углеродные нанотрубки (УНТ) имеют идеальную геометрию для создания эмиттеров электронов, а именно, высокое аспектное отношение α (отношение длины трубки к диаметру). Благодаря этой особенности нанотрубки способны усиливать электрическое поле так, что величина напряженности электрического поля E вблизи края УНТ примерно в 10^3 раз превышает среднюю величину этого параметра E_0 , определяемую как отношение приложенного напряжения к размеру межэлектродного промежутка. Благодаря высокому аспектному отношению и хорошей электропроводности вблизи концов УНТ даже при очень низких напряжениях возникает высокая напряженность электрического поля, достаточная для возникновения автоэлектронной эмиссии. Пороговая напряженность поля начала автоэмиссии нанотрубных катодов, достигнутая в настоящее время, крайне низка и составляет 0,5–1 В/мкм, плотность тока в постоянном режиме достигает 0,5 А/см² [9]. На рис. 1 представлена вольтамперная характеристика одиночной УНТ [14].

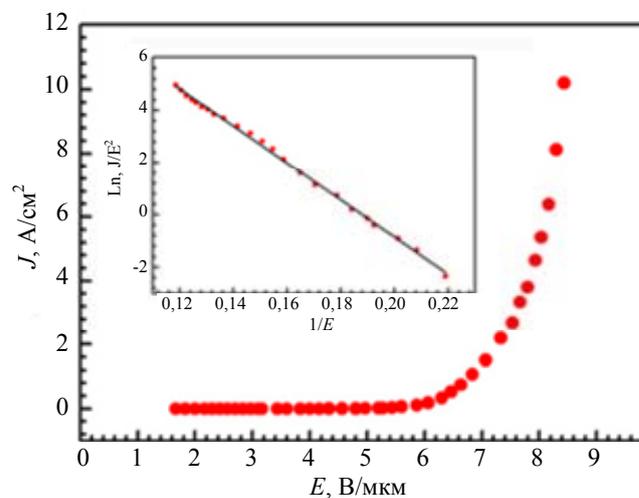


Рис. 1. Вольтамперная характеристика одиночной УНТ по [14], (на вставке представлена та же характеристика в координатах Фаулера-Нордгейма).

Возможность получения эмиссионного тока при низких напряжениях в сочетании с высокой крутизной вольт-амперной характеристики эмиссии делают УНТ перспективными для применений в качестве элементов конструкции катодов фотоэлектронных устройств.

В настоящее время известны автоэмиссионные катоды на основе различных наноструктурированных материалов [9]. На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики, построенные в соответствии с формулой Фаулера-Нордгейма для тока автоэлектронной эмиссии для углеродных однослойных нанотрубок (тубелены А-типа), многослойных (В-типа), и известные из литературы данные для кремниевых острий и алмазоподобных пленок [9]. Из рис. 2 следует, что токовая отдача тубеленов А существенно выше, чем из других наноматериалов.

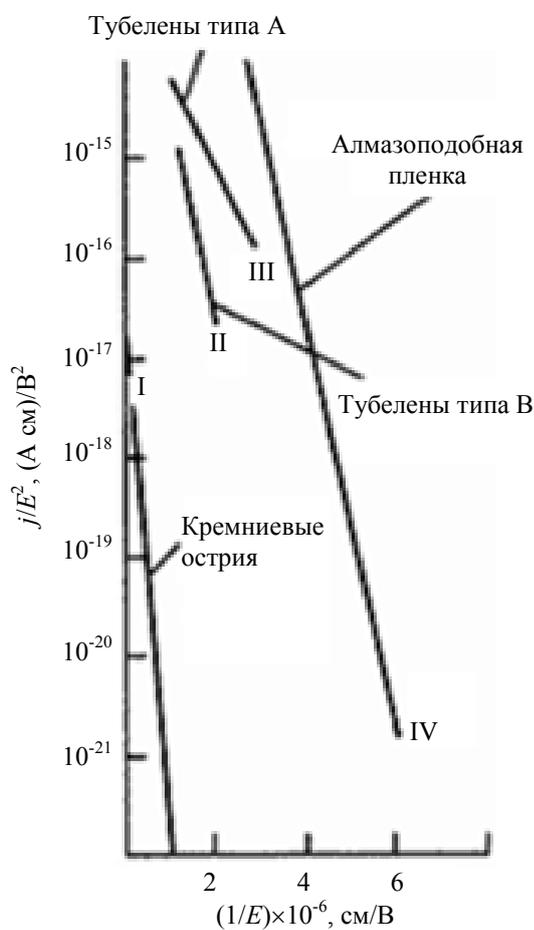


Рис. 2. Сравнительные вольт-амперные характеристики автоэлектронной эмиссии для различных наноструктурированных материалов по [9].

В конструкциях планарных автоэлектронных эмиттеров для ЭОП, состоящих из множества углеродных нанотрубок, расположенных вертикально на плоской проводящей подложке, локальное электрическое поле у кончиков нанотрубок и коэффициент усиления электрического поля β определяются не

только размерами отдельных нанотрубок, но и расстоянием между соседними нанотрубками. Вследствие эффекта взаимной экранировки электрического поля соседними нанотрубками при уменьшении расстояния между нанотрубками величина β будет существенно уменьшаться.

Величина коэффициента усиления электрического поля для планарных структур с множеством нанотрубок, расположенных на проводящей подложке перпендикулярно к ней, была рассчитана в работе [11]. В этих расчетах диаметр нанотрубок d менялся от 2 нм до 20 нм, высота нанотрубок H равнялась 10 мкм и 1 мкм, а расстояние между нанотрубками R варьировалось в диапазоне от 0,01 мкм до 200 мкм.

Результаты расчетов зависимости коэффициента усиления электрического поля β от расстояния R между равноотстоящими нанотрубками для различных сочетаний диаметров d и высот H нанотрубок представлены на рис. 3.

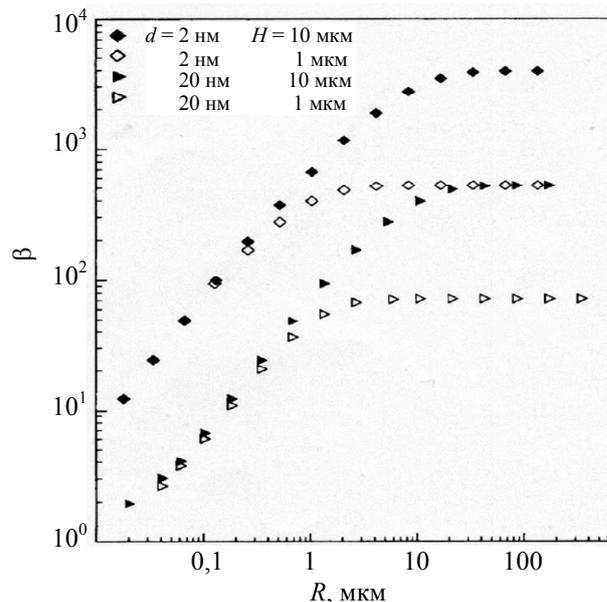


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления электрического поля β от расстояния R между равноотстоящими нанотрубками по [11].

Анализ этих зависимостей показывает, что для всех использованных параметров d и H величина β постоянна при R , превышающих критическую величину $R_{кр} \approx (1 \div 2) \times H$, но резко уменьшается, когда $R < R_{кр}$ вследствие влияния соседних нанотрубок. Величина β резко увеличивается при уменьшении диаметра

нанотрубки и достигает $\beta = 4000$ при $d = 2$ нм, $H = 10$ мкм и $R > 20$ мкм.

В настоящее время разработаны технологии насаждения углеродных нанотрубок на такие материалы как алюминий, кобальт, медь, молибден, сапфир, титан, кварц и нержавеющая сталь с необходимым шагом.

Стремление расширить область спектральной чувствительности ПНВ до второго окна прозрачности атмосферы (8–14 мкм) заставило исследователей возвратиться к давно известным пироэлектрикам [2]. Первые исследования пироэлектрического эффекта были выполнены в 1757–1765 гг. руководителем физического кабинета Санкт-Петербургской Академии наук Ф. Эпинусом [15]. В 1985 г. в ФИАН были разработаны пространственно-временные модуляторы света, в которых пироэлектрический слой осуществлял преобразование пространственного распределения падающего светового потока в двумерное распределение потенциального рельефа [5].

В качестве фоточувствительных элементов таких приборов могут использоваться пироэлектрики, у которых при изменении температуры возникает электрическое поле. Достоинствами пироэлектрических приемников являются:

– почти равномерная спектральная чувствительность в широком диапазоне (от 800 нм до 25 мкм), высокая временная стабильность и низкая стоимость;

– чувствительность в режиме панорамирования – 50 мкА/Вт;

– температурная чувствительность (NETD) пироэлектрических приемников менее 70 мК.

– наиболее используемый формат матриц 320×240 элементов, в последнее время появились матрицы форматом 640×512 и 512×256 пикселей;

– постоянная времени от 0,5 нс до 100 мкс [4].

Пироэлектрические матрицы предназначены для преобразования проецированного на неё оптического излучения инфракрасного диапазона в потенциальный рельеф, возникающий на поверхности пироэлектрических элементов при изменении их температуры вследствие поглощения теплового излучения. В таблице представлены значения вольт-ваттной чувствительности S для наиболее широко используемых пироэлектрических материалов по данным работы [3].

Таблица

Значения вольт-ваттной чувствительности и критической толщины для широко используемых пироэлектриков

| Параметры | LiTaO ₃ | ТГС | ТГФБ | ЦТСЛ | PVF ₂ |
|--------------------------------------|--------------------|-----|------|------|------------------|
| S_{\max} , В/(Вт см ²) | 350 | 800 | 1600 | 70 | 150 |
| d^* , мкм | 50 | 30 | 25 | 500 | 2 |

Примечание: ТГФБ – триглицинфторбериллат, ЦТСЛ – керамика титаната цирконата свинца, легированная лантаном, PVF₂ – поливинилиденфторид.

До 1995 г. видиконы с пироэлектрической мишенью (пировидиконы) являлись единственными неохлаждаемыми многоэлементными приемниками ИК-излучения.

Принципиально новым элементом предлагаемого ЭОП является гибридный автоэмиссионный фотокатод, который представляет собой гибридную фоточувствительную схему (ГФС), в которой собственно фотоприемная матрица пироэлектрических элементов электрически связана с системой автоэлек-

тронных эмиттеров, выполненных на основе наноструктурированных углеродных трубок.

В качестве фотоприемной матрицы пироэлектрических элементов в конструкции может быть использована матрица, аналогичная разработанной ОАО «НИИ Электрон» для пировидиконов ЛИ-512 «Кварк» и ЛИ-514 «Ковер» [4]. Мишень фотоприемной матрицы выполнена из дейтерированного триглицинсульфата (ДТГС), обладающего максимальной чувствительностью, и смонтирована на герма-

ниевом входном окне. Конструкция матрицы пироэлектрических элементов представлена на рис. 4.

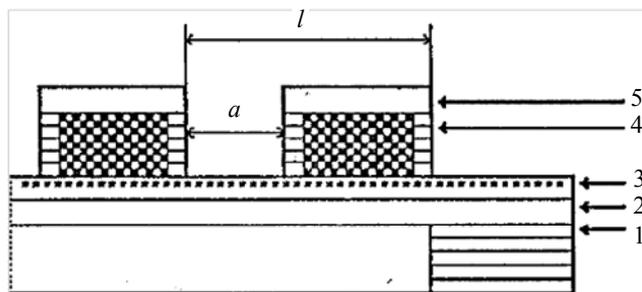


Рис. 4. Мишень пироэлектрических элементов ЛИ-512, ЛИ-514 разработки ОАО «НИИ Электрон». Конструкция мишени: 1 – металлическое кольцо; 2 – тонкая полимерная пленка; 3 – прозрачный электрод-коллектор; 4 – мозаика пироэлектрических элементов толщиной 20 мкм, шагом $l = 25$ мкм, $a = 7$ мкм; 5 – слой алюминия толщиной 0,2 мкм [4].

Известны работы, в которых рассмотрены попытки применения пироэлектриков при разработке ЭОП. Например, в [8, 12, 13] описаны устройства, содержащие пироэлектрическую мишень со сквозными отверстиями, осуществляющую модуляцию однородного (моноэнергетического) потока электронов, создаваемого вспомогательным щелочноземельным фотокатодом.

В этих патентах используются пироэлектрические элементы с целью расширения частотного диапазона ЭОП, но в обоих имеются серьезные недостатки:

1 – поток электронов проходит к регистрирующему устройству только через отверстия в пироэлектрической мишени, что снижает чувствительность и разрешение ЭОП, поскольку большая часть площади мишени не пропускает поток электронов;

2 – применение щелочноземельных фотокатодов с низкой эмиссионной способностью, для которых необходим внешний источник света для облучения катода;

3 – испарения от щелочного фотокатода, вызванные ионной бомбардировкой, приводят к быстрому выходу из строя пироэлектрических элементов вследствие отравления.

Электронно-оптический преобразователь с автоэмиссионным фотокатодом

В данной работе представлена разработка малогабаритного неохлаждаемого преобразователя изображения в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах в изображениях в видимом диапазоне или в электрический сигнал на базе классического электронно-оптического преобразователя, в котором устраняются отмеченные выше недостатки известных конструктивных решений ЭОП.

Нами разработан и запатентован ЭОП, обладающий высокой чувствительностью во всем инфракрасном диапазоне и работающий без охлаждения [6, 7]. Это достигается тем, что электронно-оптический преобразователь содержит в своей вакуумированной колбе следующие узлы: 1) входное окно, прозрачное в инфракрасной области спектра; 2) фотокатод, расположенный на внутренней поверхности входного окна и создающий поток электронов; 3) микроканальный усилитель и устройство регистрации двумерного электронного изображения.

При этом в качестве катода применен автоэмиссионный фотокатод, выполненный в планарной технологии в виде матричного пироэлектрического слоя из отдельных дискретных элементов, на которые нанесены автоэмиссионные излучатели, выполненные на основе углеродных наноструктурированных материалов, а управление потоком электронов эмиссии катода осуществляется упомянутым пироэлектрическим слоем за счёт дополнительного поля, создаваемого пространственным распределением потенциалов на этом слое, при изменении температуры пироэлектрического материала в результате поглощения им входного инфракрасного излучения.

Блок-схема предлагаемого устройства поясняется рис. 5. В деталях показан разработанный авторами вариант конструкции автоэмиссионного катода – нового элемента в предлагаемом решении. Анализируемое ИК-излучение проходит через входное окно 1, выполненное из прозрачного в исследуемом диапазоне длин волн материала, отсекающего коротковолновую часть спектра, имеющее просветляющее покрытие 11 на наружной поверхности. Входное окно 1 заключено в металлическое кольцо 2. На внутреннюю поверхность входного окна наносятся следующие элементы:

прозрачный проводящий слой 3 (например, оксида индия-оксида олова), имеющий гальванический контакт с металлическим кольцом 2;

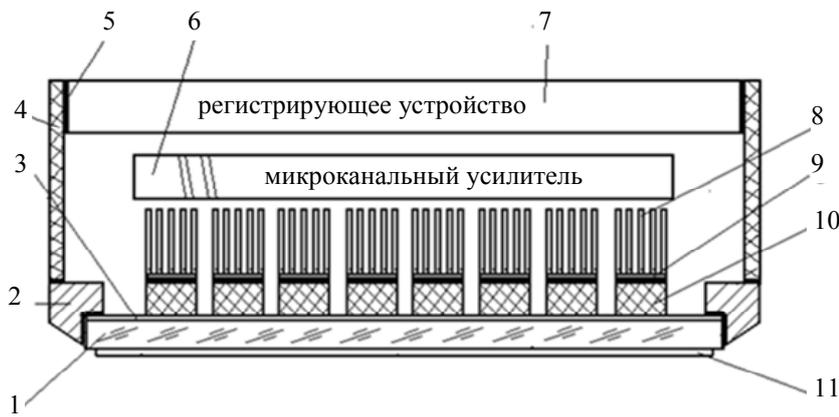


Рис. 5. Конструкция электронно-оптического преобразователя с автоэмиссионным фотокатодом.

слой пьезоэлектрического материала (например, сегнетоэлектрика ДТГС), разделенный на отдельные мозаичные элементы 10 субмикронного размера;

сплошной металлический электрод 9 пьезоэлемента;

система ортогонально ориентированных к поверхности пьезоэлемента автоэмиттирующих электроны острий 8, выполненных на основе углеродных наноструктурированных материалов с высоким аспектным отношением (например, углеродных нанотрубок).

Микроканальный усилитель 6 расположен за автоэмиссионным катодом. Устройство регистрации двумерного электронного изображения 7 выполняется в виде люминесцентной панели или электронно-чувствительной матрицы. Указанные элементы конструкции помещены в вакуумированный объем, образуемый керамическим корпусным кольцом 4 и герметизирующими слоями 5.

Такой ЭОП представляет собой объединение в одном приборе матричного пироприемника ИК-излучения, автоэмиссионного преобразователя потенциального рельефа в пространственное распределение плотности тока эмиссии и электронно-оптического преобразователя, в котором входное ИК-изображение преобразуется в видимое, отображаемое на катодо-люминесцентном экране. При этом электрическое поле наведенного заряда в пьезоэлектрике модулирует поток электронов, испускаемых нанотрубчатыми остриями-эмиттерами.

Реализуемость изобретения обеспечена следующими факторами.

1. Технологией изготовления пьезоэлектрических матриц, предназначенных для пре-

образования проецированного на неё оптического излучения инфракрасного диапазона в потенциальный рельеф, возникающий на поверхности пьезоэлектрического элемента, которая в настоящее время хорошо отработана и широко применяется в пировидиконах. В работе [10] сообщается о создании на основе мозаичных пьезоэлементов размерами $20 \times 18 \times 18$ мкм из дейтерированного триглицинсульфата пировидикона для спектрального диапазона 8–14 мкм.

2. В настоящее время известно значительное количество работ, посвященных разработке технологии изготовления автоэмиссионных катодов на основе УНТ [11], [12].

Указанные ранее недостатки известных устройств устранены за счет разработки оригинальной конструкции гибридного автоэмиссионного катода предлагаемого ЭОП. Новый эффект достигается за счет расширения спектрального диапазона устройства вплоть до дальнего инфракрасного диапазона, обеспечения высокой чувствительности и высокой разрешающей способности.

Заключение

Теоретически и практически апробированным резервом повышения чувствительности гибридных фотокатодов является нанесение субмоноатомных и моноатомных слоев щелочных металлов на углеродные нанотрубки. Имеются сообщения [11, 14], что нанесение атомов цезия на многостенные нанотрубки приводит к уменьшению их работы выхода примерно на 2 эВ, а порогового напряжения примерно в 1,3 раза и росту эмиссионного тока на один порядок величины.

Разработка и создание электронно-оптических преобразователей с гибридными автоэмиссионными фотокатодами, обладающими высокой чувствительностью во всем инфракрасном диапазоне и работающими без охлаждения, является важным этапом в развитии инфракрасной техники и альтернативой традиционным тепловизионным системам и приборам ночного видения.

Расширение длинноволновой границы спектральной чувствительности электронно-оптических преобразователей изображения в область среднего и дальнего инфракрасного диапазонов (до 40 мкм) с одновременным повышением их чувствительности фактически переводит ЭОП из класса приборов ночного видения в класс тепловизионных приборов (пирометры, тепловизоры).

Исследование выполнено за счет
средств субсидии на обеспечение
выполнения государственного задания
№ АААА-А17-117052410034-6
в ИАиЭ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айнбунд М. Р., Васильев И. С., Виллькин Г. Е. и др. // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 97.

2. Анцыгин В. Д., Косцов Э. Г., Соколов А. А. // Автометрия. 1986. № 02. С. 30.

3. Бараночников М. Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. – М.: ДМК Пресс, 2012.

4. Березкин Н. А., Меркин С. Ю., Москвина Н. Н. и др. // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 101.

5. Ваиурин П. В., Дергачев Д. Н., Компанец И. Н. и др. Пространственно-временной модулятор света на основе структуры «пироэлектрик-жидкий кристалл». – М., 1985 (Препр./ФИАН).

6. Гибин И. С., Котляр П. Е. Патент RU № 2657338 от 13.06.2017.

7. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 3. С. 497.

8. Гончаренко Б. Г. и др. Патент RU 2325725 от 10.06.2006.

9. Гуляев Ю. В. // Вестник Российской академии наук. 2003. Т. 73. № 5. С. 389.

10. Елинсон М. И., Васильев Г. Ф. Ненакапливаемые катоды. – М.: Наука, 1974.

11. Израэльянц К. Р. Эмиссионные характеристики углеродных нанотрубок в постоянном и слабом высокочастотном электрических полях. Диссерт. к.ф.-м.н. – Москва, 2014.

12. Карамурзов Б. С. Патент RU 2476952 С2 от 27.02.2013.

13. Муртазин А., Олихов И., Соколов Д. Пироэлектрический электронно-оптический преобразователь // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 1. С. 26.

14. Петрухин Г. Н. Разработка конструктивно-технологических методов роста углеродных наноструктур для автоэмиссионных применений. – М., 2010.

15. Эпинус Ф. Т. У. Теория электричества и магнетизма. – М., АН СССР, 1951.

PACS: 03.65 Ta

Electron-optical converter with autoemission photocathode

I. S. Gibin^{1,2} and P. E. Kotlyar¹

¹Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences
1 Akademika Koptuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

²Novosibirsk State Technical University
20 K. Marks Ave., Novosibirsk, 630073, Russia
E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

Received May 6, 2019

The article provides the analysis of electron-optical converters. There is mentioned a tendency towards the expanding of their working spectrum rate into the sphere of infrared radiation and the growth of sensitivity. The expansion of the long-wave length border of the spectral sensitiv-

ity of electron-optical converters with the simultaneous sensitivity growth is possible by means of use of field-emission cathodes which possess unique emission characteristics. The article offers electron-optical converters with the autoemission photocathode. The construction of such a converter has been worked out, besides the article observes the working regime and evaluates the sensitivity and spectrum rate. It is mentioned that the development and creation of the electron-optical converters with autoemission photocathodes which work in infrared range is an important step in the development of infrared techniques.

Keywords: electron-optical converter, autoemission photocathode, infrared radiation, piroelectric matrix, night vision devices, thermovision.

REFERENCES

1. M. R. Ainbund, I. S. Vasiliev, G. E. Villkin, et al., Prikl. Fiz., No. 4, 97 (2006).
2. V. D. Antsygin, E. G. Kostsov, and A. A. Sokolov, Avtometriya, No. 02, 30 (1986).
3. M. L. Baranochnokov, Radiation receivers and detectors. Handbook. (DMK Press, Moscow, 2012) [in Russian].
4. N. A. Berezkin, S. Y. Merkin, N. N. Moskvina, et al., Prikl. Fiz., No. 4, 101 (2006).
5. P. V. Vashurin, D. N. Dergachev, I. N. Kompanets, et al., *Spatiotemporal light modulator based on the structure "pyroelectric liquid crystal"*. M., 1985. (Preprint of Lebedev Physical Institute, Moscow, 1985) [in Russian].
6. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Patent RU No. 2 657 338, July, 13 2017.
7. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Usp. Prikl. Fiz. **5** (3), 497 (2014).
8. B. G. Goncharenko et al., Patent RU No. 2 325 725, June, 10 2006.
9. U. V. Gulaev, Vestnik Ross. Akad. Nauk **73** (5), 389 (2003).
10. M. U. Elinson and G. F. Vasiliev, Non-accumulative cathodes (Moscow, Nauka, 1974) [in Russian].
11. K. R. Israelanz, *Emission characteristics of carbonic nanotubes in constant and weak high-cycle electric fields*. (PHD Dissertation, Moscow, 2014).
12. B. S. Karamurzov, Patent RU No. 2 476 952 C2, February, 27 2013.
13. A. Muratasin, I. Olikhov, and D. Sokolov, Elektronika, No. 1, 26 (2006).
14. G. N. Petrukhin, *Development of constructive-technological methods of carbonic nanostructures increase for autoemission applications*. (Moscow, 2010) [in Russian].
15. F. T. Epinus, *Theory of electricity and magnetism*. (Academy of Sciences USSR, Moscow, 1951) [in Russian].