

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В.ЛОМОНОСОВА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА**

**С.Г. Белостоцкий, Е.А. Муратов, Д.В. Лопаев,  
А.Т. Рахимов, В. Б. Саенко**

**КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА  
БОЛЬШОЙ ЯРКОСТИ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
ПОВЫШЕНИЯ СВЕТООТДАЧИ ЛЮМИНОФОРНОГО  
ПОКРЫТИЯ.**

**Препринт НИИЯФ МГУ - 2004 –21/760**

УДК 621.3.032.35

ББК 22.345

E-mail: [VSaenko@mics.msu.su](mailto:VSaenko@mics.msu.su)

Preprint of Institute of Nuclear Physics № 2004-21/760

**S.G. Belostotsky, D.V. Lopaev, E.A. Muratov, A.T. Rakhimov, V.B. Saenko**  
**CATHODOLUMINESCENT SOURCE OF VISIBLE LIGHT OF HIGH BRIGHTNESS AND**  
**ANALYSIS OF POTENTIALITIES OF SCREEN EFFICIENCY ENHANCEMENT.**

**Abstract**

A new pollution-free wide-angle efficient source of visible light of high brightness by using the "open" discharge in inert gases has been developed. Direct excitation of phosphor screen by runaway electron beam is its principal feature. About 80% of energy deposited into the discharge is carried by runaway electron beam.

The optimization of construction features of the light source has been carried out. As a result, the efficiency of more than 30 lm/W and brightness of more than 20000 cd/m<sup>2</sup> have been obtained. Furthermore, as experimentally shown, the intensity of a "back" light flux from the phosphor surface in the direction of the electron beam is 2-3 times higher than the light flux intensity behind the phosphor screen. The evaluative calculations have confirmed these results. Thus, the application of special phosphor arrangement allows one to increase a total light yield and provide the source efficiency, comparable with the mercury-containing photoluminescent lamps. Constructive simplicity and respective low cost of the light source advantageously distinguish it from other cathodoluminescent lamps.

This work has been carried out under support of RFBR grants 02-02-08069 and 1713.2003.2.

**С.Г. Белостоцкий, Е.А. Муратов, Д.В. Лопаев, А.Т. Рахимов, В. Б. Саенко**  
**КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА БОЛЬШОЙ ЯРКОСТИ И**  
**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ СВЕТООТДАЧИ ЛЮМИНОФОРНОГО**  
**ПОКРЫТИЯ.**

**Аннотация**

В настоящей работе разработан новый экологически чистый широкоапертурный эффективный источник видимого света высокой яркости на основе открытого разряда в инертном газе. Его принципиальной особенностью является использование прямого возбуждения люминофорного экрана пучком убегающих электронов, на формирование которого идёт ~80% от энергии, вложенной в разряд.

Были проведены исследования по оптимизации параметров конструкции данного источника света, в результате которых были достигнуты эффективность более 30 лм/Вт и яркость более 20000 кд/м<sup>2</sup>. Более того, как показали эксперименты (и это было подтверждено расчётами), интенсивность светового потока с поверхности слоя люминофора, обращенного в направлении электронного пучка, в 2-3 раза превышает интенсивность света за слоем люминофора. Это даёт возможность за счёт изменения традиционной схемы конфронтального расположения люминофора значительно увеличить суммарную светоотдачу и тем самым обеспечить эффективность источника света, сравнимую с ртутьсодержащими фотолюминесцентными лампами. Простота и относительная дешевизна конструкции предлагаемого источника выгодно отличают его от существующих катодолюминесцентных ламп.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №02-02-08069 и проекта НШ-1713.2003.2.

© С.Г. Белостоцкий, Е.А. Муратов, Д.В. Лопаев,  
А.Т. Рахимов, В. Б. Саенко

© НИИЯФ МГУ, 2004

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	4
2. КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА НА ОСНОВЕ ОТКРЫТОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА И ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЕГО РАБОТЫ.....	5
3. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ БОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТООТДАЧИ ЛЮМИНОФОРНОГО ПОКРЫТИЯ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЭКРАНОВ.....	8
4. ЛИТЕРАТУРА.....	17

## ВВЕДЕНИЕ.

В последние годы во многих областях производства находят все большее применение методы высокой технологии, которые основаны на достижениях современной науки. Этот фактор в конечном итоге положительно сказывается на профессиональном уровне и культуре самого процесса производства и, как следствие, на качестве и потребительском спросе изготавливаемой продукции. Немаловажным является соответствующий подбор исходных компонент для реализации готового изделия в виде экологически чистого конечного продукта.

Все сказанное выше в особой степени относится к современному состоянию и уровню развития отечественной светотехники, одним из определяющих направлений которой является разработка и создание эффективных световых источников. Заметим, что эта сфера производства, как никакая другая, предназначена для выпуска изделий, предназначенных для использования в условиях непосредственного контакта с потребителем. По этой причине появляются дополнительные требования по обеспечению безопасности при целевом использовании прибора (электрическая защита, отсутствие токсичных компонент и ионизирующего излучения и т. д.).

На протяжении многих лет мы вынуждены использовать на производстве и в быту лампы с накаливаемыми катодами в вакуумной или газовой среде. Недолговечность таких источников очевидна. Однако энергетическая эффективность этих излучателей неоспоримо высока, что и объясняет их конкурентоспособность. Так, например, источники света с использованием газового разряда с добавкой ртути обеспечивают рекордные значения световой эффективности (более 60 лм/Вт) и широко используются в быту, а также в качестве источников ионизирующего излучения. Однако на современном этапе, когда еще недостаточно полно решены вопросы безопасности эксплуатации ртутных ламп и совершенствования методов их утилизации, по-прежнему актуальной остается задача по созданию новых экологически чистых и эффективных источников света. В настоящее время в ряде стран (США, Япония, КНР и др.) ведутся интенсивные работы с целью создания источников света, исключающих использование вредных веществ (ртуть, сера и т.п.).

В отделе микроэлектроники НИИ Ядерной Физики МГУ на протяжении ряда лет ведутся экспериментальные исследования с целью создания широкоапертурного источника света высокой яркости. Сотрудниками отдела предложен оригинальный способ создания светового излучателя с использованием Открытого Разряда [1].

Данное изобретение относится к классу светоизлучающих устройств с использованием облучения катодолуминофорных экранов электронным пучком. Источник света в данном случае является газоразрядным прибором. В качестве среды излучателя используются инертные газы. Простота и относительная дешевизна элементной базы предлагаемого светового источника, отсутствие экологически вредных примесей в рабочей газовой среде, практически неограниченная возможность масштабирования светового поля излучения – все это выгодно отличает его от существующих катодолуминесцентных ламп. Способ генерации электронного пучка в газовой среде и конструктивное исполнение источника защищены патентами РФ и США [2].

## Часть I.

### **КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА НА ОСНОВЕ ОТКРЫТОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА И ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЕГО РАБОТЫ.**

Принципиальной особенностью предлагаемого источника света является использование прямого возбуждения люминофорного экрана электронным пучком в газовой среде, на формирование которого идет более 80% от полной энергии вложенной в разряд.

Источник света может быть выполнен в стеклянном или металлокерамическом корпусе с прозрачным экраном, покрытым люминофором. Электродная система излучателя довольно проста и представляет собой плоский металлический катод и сетчатый анод, расположенные параллельно с малым зазором. За счет должного подбора энергетических параметров в такой системе организуется разряд, в котором большая часть электронов существует в виде высокоэнергетического пучка. Пучок электронов, образованный таким образом, проходя через сетку, непосредственно возбуждает люминофорное покрытие экрана лампы (см. рисунок 1).

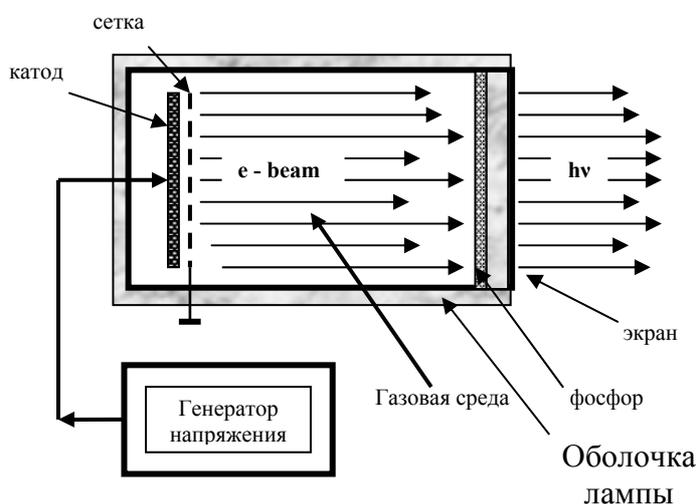


Рис. 1

Положительные ионы и фотоны, образованные в дрейфовом газовом пространстве (между сеткой и экраном), проникают обратно через сетчатый анод и вызывают вторичную эмиссию непосредственно с катода.

Следует особо заметить, что в данной электродной системе используются холодный катод и анодная сетка большой геометрической прозрачности (>80%) и, так как токовая нагрузка на сетку в этом случае незначительна, то это должно положительно сказаться на ресурсе работы прибора в отпаянном виде.

Питание лампы осуществляется от высоковольтного источника напряжения. Величина приложенного напряжения к катоду электронного инжектора определяется требуемыми световыми характеристиками целевого назначения световых излучателей подобного типа и составляет величину порядка 1÷6 кВ. Этот диапазон энергий скорее всего можно условно назвать средневольтным в отличие от традиционных низковольтных  $\leq 1$  кВ (световые индикаторы) и высоковольтных  $\geq 10$  кВ (ЭЛТ).

Именно этот энергетический диапазон представляет интерес с точки зрения возможности использования таких световых источников для широкого круга прикладных задач, так как проблема обеспечения надежной изоляции

высоковольтной цепи питания в этом случае может быть успешно решена. Более того, определенный научный интерес представляет собой более детальный анализ процесса распространения электронного пучка средних энергий в слое люминофорного покрытия (в отличие от высоковольтных). Более подробно этого вопроса мы коснемся в главе II.

В результате проведенных стендовых испытаний многочисленных конструкций источников света нами были определены следующие оптимальные характеристики излучателей:

- а) размер ячейки анодной сетки, величина зазора сетка-катод в зависимости от плотности и сорта газа;
- б) соотношение эффективных площадей анодной сетки и катода;
- в) оптимальная длина дрейфового пространства;
- г) выбор сорта газа для обеспечения устойчивой работы ОР и минимального влияния процесса жесчения катода;
- д) выбор оптимальной толщины люминофорного покрытия экрана и сорта (марки) фосфора;
- е) возможные конструктивные решения при реализации катодно-сеточного узла большой площади с целью уменьшения влияния микрофонного эффекта при работе излучателя в частотном режиме;
- ж) необходимость целевого использования Al-покрытия люминофорного слоя экрана и т.д.

В результате наших экспериментальных исследований [3] были получены следующие основные характеристики для излучателей данного типа: яркость светового потока  $\sim 25.000 \text{ кД/м}^2$ , энергетическая световая эффективность  $\sim 30 \text{ лм/Вт}$  (при напряжении на катоде  $\sim 7 \text{ кВ}$ ). Полученные данные можно считать довольно высокими для световых характеристик катодолюминесцентных экранов (см. рисунок 2)

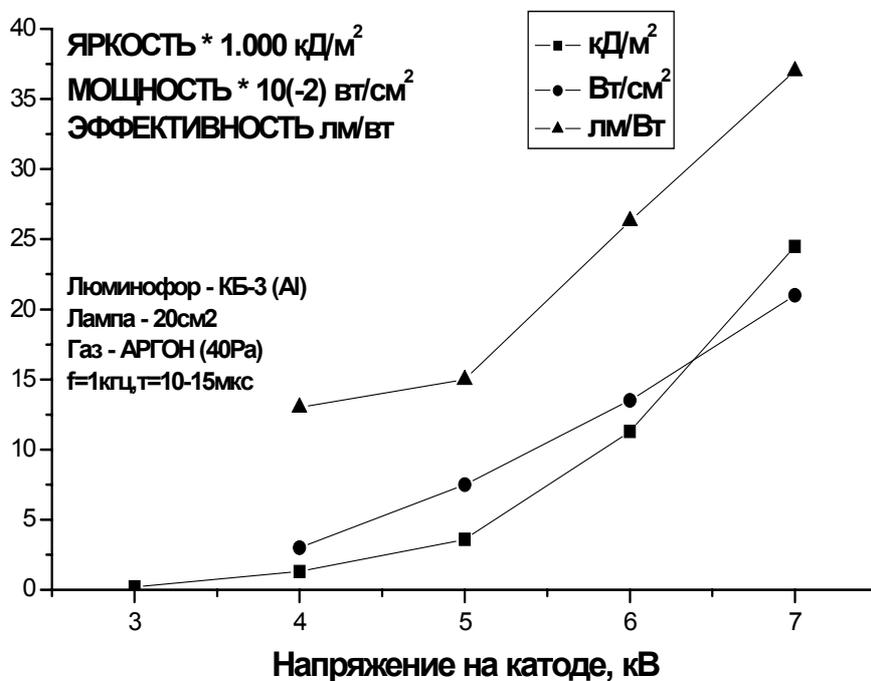


Рис. 2.

Следует отметить, что весь цикл исследований был проведен на экспериментальных стендах с использованием опытных образцов излучателей, работающих в режиме слабого протока газа.

В настоящее время авторами определен круг проблем технологического характера, связанных с процессом непосредственного изготовления опытных образцов световых источников подобного типа в отпаянном виде и имеется достаточно полное понимание возможных способов их решения на всех этапах технологической цепочки изготовления прибора.

На заключительном этапе выполнения работ предусматриваются ресурсные испытания изготовленных отпаянных приборов с заданными световыми и пространственными характеристиками.

Таким образом, в данной работе авторами предложен совершенно новый тип газоразрядного катодолюминесцентного источника света [2]. Использование режима “убегающих” электронов [1] в дрейфовом газовом пространстве позволяет в широких пределах менять его световые и энергетические характеристики, которые зависят не только от ускоряющего напряжения на катоде электронного инжектора (как в ЭЛТ), но и от плотности и сорта газа. Более того, ионный механизм поддержания такого газового разряда (ОР) предопределяет возможность непосредственного управления уровнем яркости источника света с использованием дополнительного внешнего низковольтного ( $0 \div 100$  В) источника [4]. Высокие яркостные характеристики, простота и многообразие возможных конструктивных решений приборов данного типа – все это выгодно отличает их от существующих и определяет широкий спектр их возможного использования.

#### Возможные применения источников света на основе ОР.

Очевидно, что в различных областях целевого использования к источникам излучения предъявляются существенно различные требования по яркости, цветовой гамме излучения, энергетической эффективности, ресурсу, размерам, диаграмме направленности светового потока и т.д.

Перечислим еще раз основные характеристики предлагаемого источника, которые выгодно отличают его от целого ряда существующих:

- а) достаточно большой ресурс работы электродного узла (холодный катод, низкая энергетическая нагрузка на анодную сетку),
- б) отсутствие вредных примесей в рабочей газовой среде,
- в) исключена возможность мгновенного перегорания,
- г) широкая диаграмма видности ( $2\pi$ ),
- д) возможность трансформирования конструкции электродного узла в пространстве (при сохранении зазора сетка–катод),
- е) практически неограниченное масштабирование светового поля.

Все эти характеристики определяют возможные области целевого применения источников света высокой яркости и большого поля излучения: светофоры, рекламные щиты, дорожные указатели, информационные табло, световая разметка взлетно-посадочной авиационной полосы, сигнальный корабельный прожектор, автомобильные и авиационно-бортовые дисплеи и т.п.

## Часть II.

### **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ БОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТООТДАЧИ ЛЮМИНОФОРНОГО ПОКРЫТИЯ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЭКРАНОВ.**

Известно, что уровень энергетической эффективности  $\eta$  (лм/Вт) катодолюминесцентных экранов определяется исключительно энергией электронного возбуждения люминофорного слоя. Можно считать, что в любом случае абсолютная величина  $\eta$  будет зависеть, в первую очередь, от энергии электронного пучка, а также от толщины и состава фосфорного покрытия экрана.

Таким образом, можно ожидать, что применение пучков, обладающих «сверх» высокой энергией (>10 кВ), может позволить достичь довольно высоких значений  $\eta$ , сравнимых с ртутьсодержащими источниками света.

Действительно, как продемонстрировано в работе [5], для целого ряда люминофоров удается достичь весьма значительных величин  $\eta$  – 90 лм/Вт (G), 30 лм/Вт (B), 35 лм/Вт (R). Однако такие высокие характеристики достигаются весьма значительным форсированием ускоряющего напряжения (~ 14 кВ). Более того, значительная величина энергетической нагрузки на фосфорное покрытие (> 0.5 Вт/см<sup>2</sup>) и наличие нити накала в качестве эмиттера электронов вызывают некоторые сомнения в плане долговечности работы такого прибора, не говоря уж о необходимости обеспечения надежной электроизоляции.

Следует отметить, что результаты, представленные в работах [3, 5], получены с использованием Al – покрытия внутренней поверхности люминофорного слоя, обращенной в направлении электронного пучка. При этом свет возбужденного слоя люминофора, излучаемого в направлении дрейфового пространства, отражается от пленки Al и, проходя обратно через достаточно тонкий слой фосфора, вносит дополнительный вклад в излучение прибора. Такой способ «зеркального отражения» позволяет увеличить световой поток с экрана примерно в 1.5 раза.

В этой главе мы попробуем проанализировать возможности более полного использования светоотдачи люминофорного слоя (без Al – покрытия), учитывая не только проходящий световой поток через стекло экрана, но и «отраженный» свет с поверхности фосфора, обращенной в направлении электронного инжектора.

Особо следует подчеркнуть, что при исследовании процессов происходящих в люминофорном слое при воздействии на него потока электронов мы ограничимся «средневольтовой» областью энергий электронов (0 – 7 кВ).

В процессе эксплуатации приборов с использованием данного диапазона ускоряющих напряжений в достаточной мере может быть решен вопрос обеспечения надежной электроизоляции токонесущих элементов питания. Выбранный диапазон энергий представляет также особый интерес с точки зрения изучения процесса прохождения электронного пучка через слой люминофора.

Предварительные оценки плотности фосфорного состава (5 – 10 г/см<sup>3</sup>) и характерных поверхностных нагрузок (2 – 4 мг/см<sup>2</sup>) позволяют предположить, что при сравнительно небольших энергиях может иметь место заметное поглощение пучка в слое фосфора, а, следовательно, уровень возбуждения поверхностного слоя, обращенного к пучку будет значительно превышать уровень возбуждения фосфора на границе с экраном. Если это так, то можно ожидать, что световой поток с поверхности фосфора в направлении электронного инжектора будет существенно превышать проходящий свет с экрана (см. рис. 3).

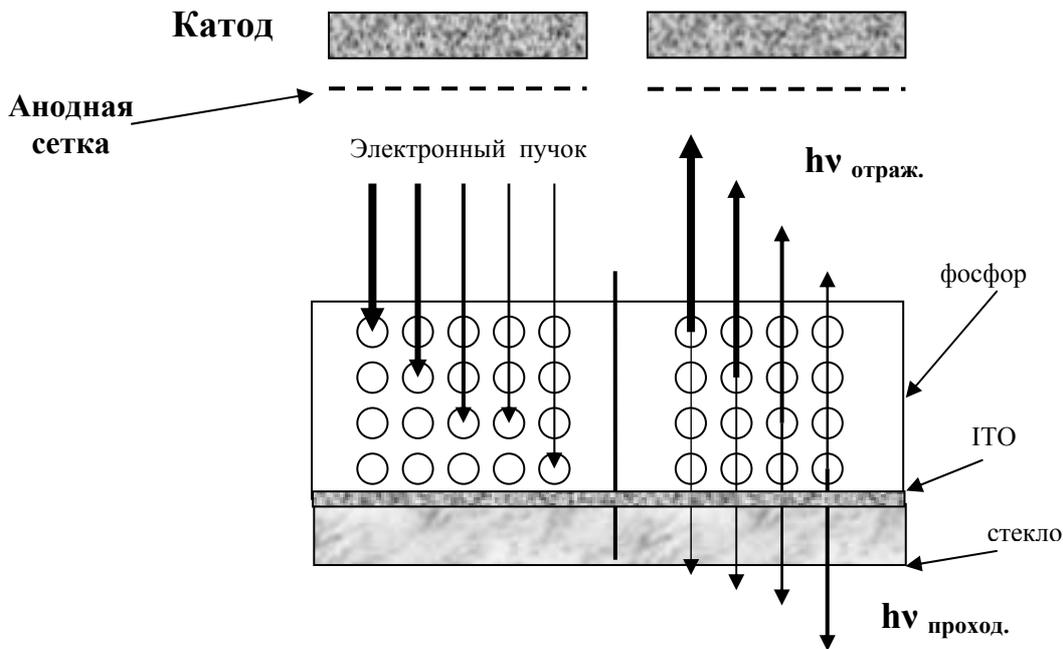


Рис 3.

С целью экспериментальной проверки вышеизложенного были проведены непосредственные измерения отраженного и проходящего световых потоков от люминофорного экрана при возбуждении фосфорного покрытия электронным пучком.

Основные функциональные элементы схемы (инжектор электронов, люминофорный экран, приемники света) были размещены в вакуумной камере, через которую осуществлялась медленная прокачка газа (см. рис. 4).

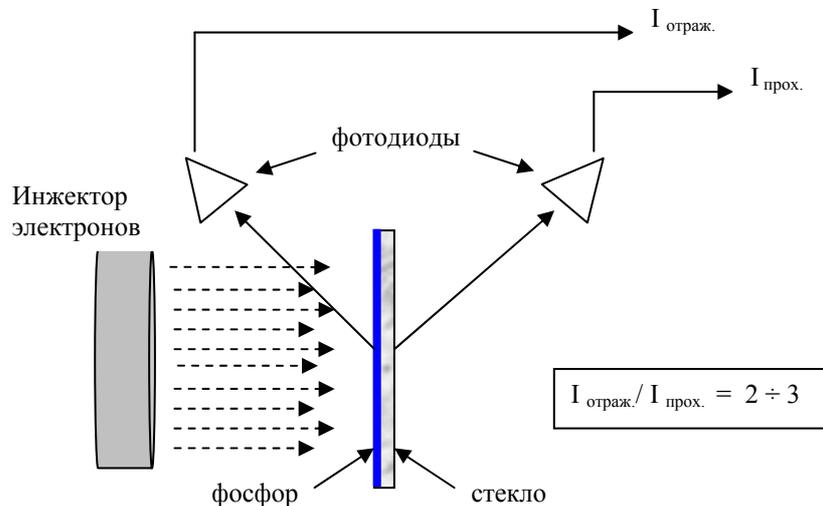


Рис. 4.

В качестве рабочей газовой среды использовался гелий. Давление газа в ходе эксперимента поддерживалось постоянным ( $\sim 1$  тор). Инжектор имел катодно-сеточную конструкцию (см. рис. 1) и обеспечивал апертуру электронного пучка диаметром 40мм. На расстоянии  $\sim 5$  см от инжектора располагался люминофорный экран ( $\varnothing 60$  мм). Таким образом, при подаче напряжения на катод инжектора в камере инициировался пучок убегающих электронов. Световые потоки непосредственно с поверхности люминофора (отраженный) и с экрана (проходящий)

регистрировались двумя фотодиодами с одинаковой чувствительностью. На рисунке 5 представлены характерные зависимости световых потоков  $I_{\text{отраж.}}$  и  $I_{\text{прох.}}$  от энергии электронного пучка.

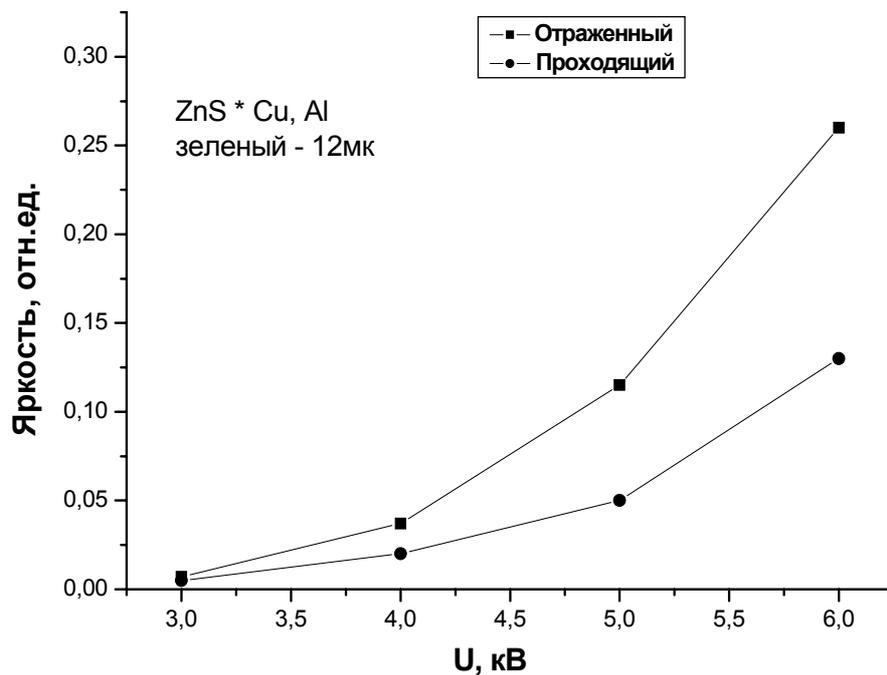


Рис. 5.

Следует отметить, что в исследуемом энергетическом диапазоне для разных сортов фосфора отношение  $I_{\text{отраж.}}/I_{\text{прох.}}$  различно, но, как правило, отраженный свет превышает проходящий в  $2 \div 3$  раза.

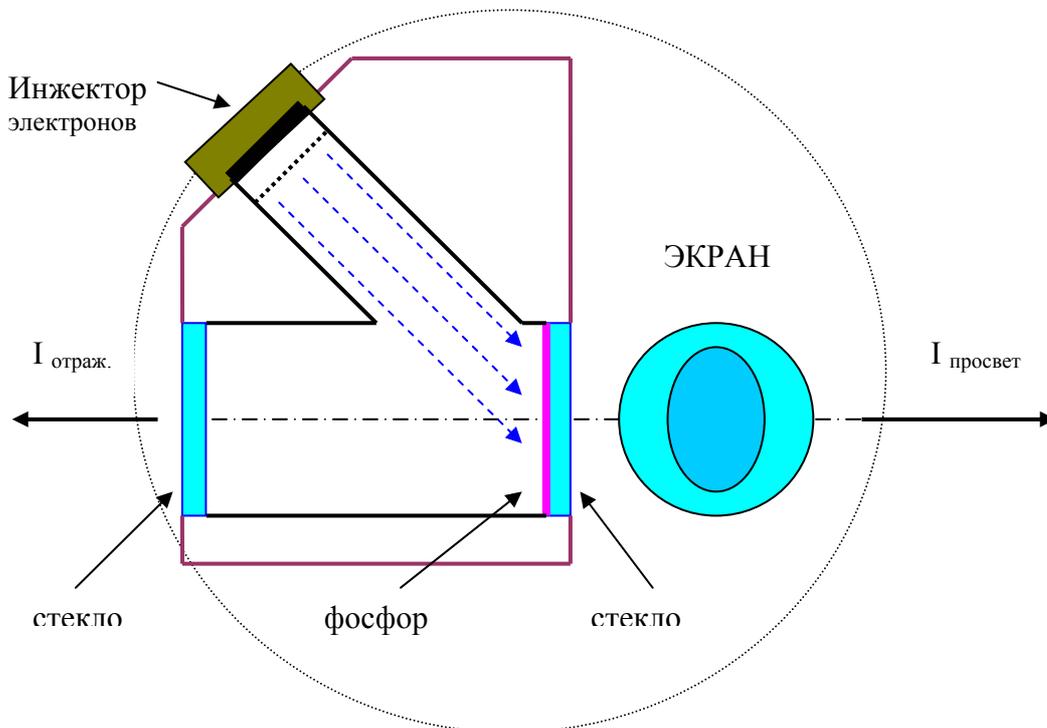


Рис. 6.

Очевидно, чтобы иметь дополнительную возможность использовать обратный световой поток от люминофорного экрана необходимо найти такие конструктивные решения, которые обеспечивали бы отсутствие инжектора на пути фронтального распространения отраженного света.

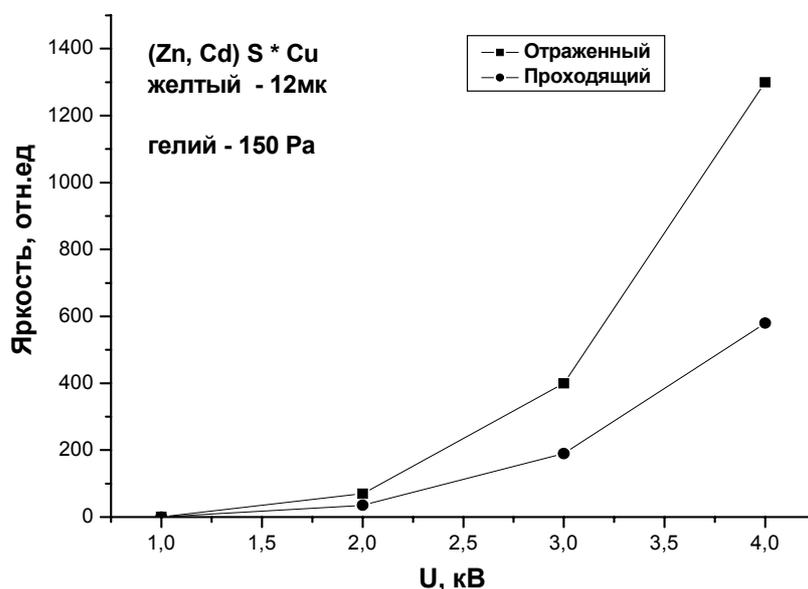


Рис. 7.

С целью конструктивного моделирования такого светового излучателя нами была опробована система, в которой люминофорная мишень подвергалась воздействию электронного пучка, падающего на фосфорное покрытие под углом  $45^{\circ}$  (см. рис. 6). Конструкция вакуумной камеры позволяла независимо регистрировать отраженный и проходящий свет от люминофорного экрана. Измерения световых потоков осуществлялось с применением фотометра фирмы «EG&G» – Model 550, каустика видности которого ( $1 \text{ см}^2$  на длине в 1 фут) обеспечивала достоверность измерений яркостных характеристик с поверхности экрана и фосфорного покрытия. На рисунке 7 представлены характерные зависимости  $I_{\text{отраж.}}$  и  $I_{\text{прох.}}$  от энергии падающего пучка.

Как видно, характеристики, приведенные на рисунке 7, в достаточной степени подтверждают результаты, полученные ранее с использованием фотодиодов в качестве регистрирующих элементов.

Отметим, что в данном эксперименте мы не ставили перед собой цель получить максимально возможные потоки отраженного и проходящего света, так как конструкция данного излучателя изначально не являлась оптимальной (большая длина дрейфового пространства, неравномерность светового поля экрана, малый угол видности отраженного света). Однако, данный конструктивный проект позволил наглядно продемонстрировать возможность реализации двустороннего светового излучателя (см. рисунок 8 и фото 9).

Становится очевидным, что если реализовать возможность одновременного использования отраженного и проходящего световых потоков за счет конструктивного изменения схемы конфронтального расположения инжектора электронов и катодолюминесцентного экрана, можно значительно увеличить суммарную световую эффективность источника света при той же изначально потребляемой мощности. Это существенным образом меняет традиционный подход к оценке световой эффективности катодолюминофорных экранов в плане

конкурентоспособности с традиционными световыми источниками и, возможно, позволит решить задачу создания оригинального и высокоэффективного излучателя.

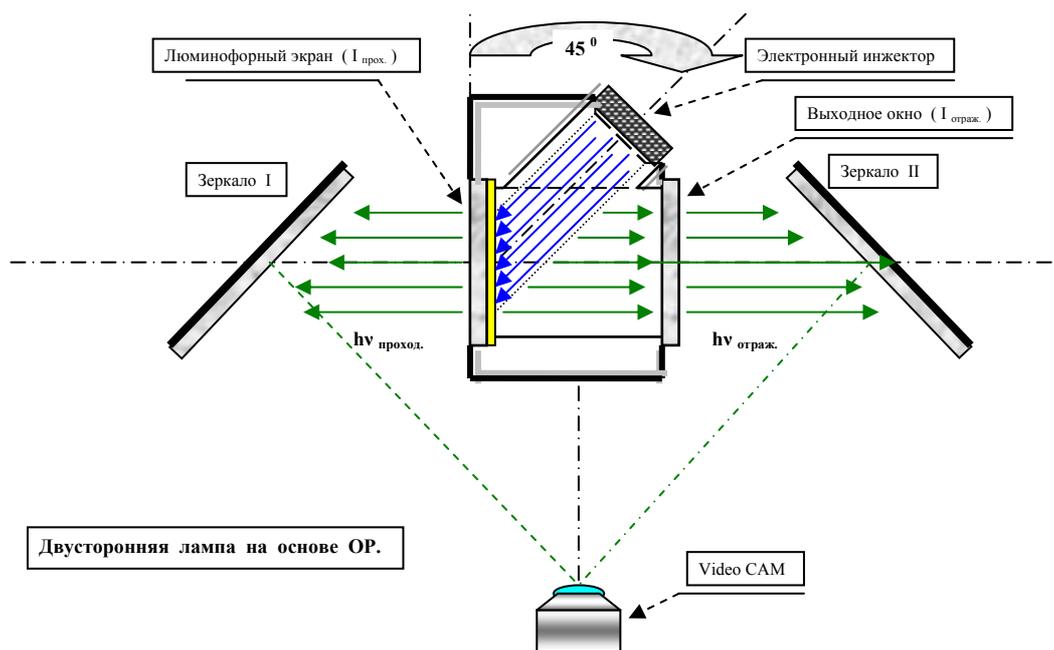


Рис. 8.



Рис. 9.

Особо следует отметить, что при создании такого прибора важным и существенным моментом является его конструктивное исполнение.

В результате целого ряда конструктивных проработок мы ограничились наиболее оптимальной, на наш взгляд, конструкцией двунаправленного источника света (см. рисунок 10).

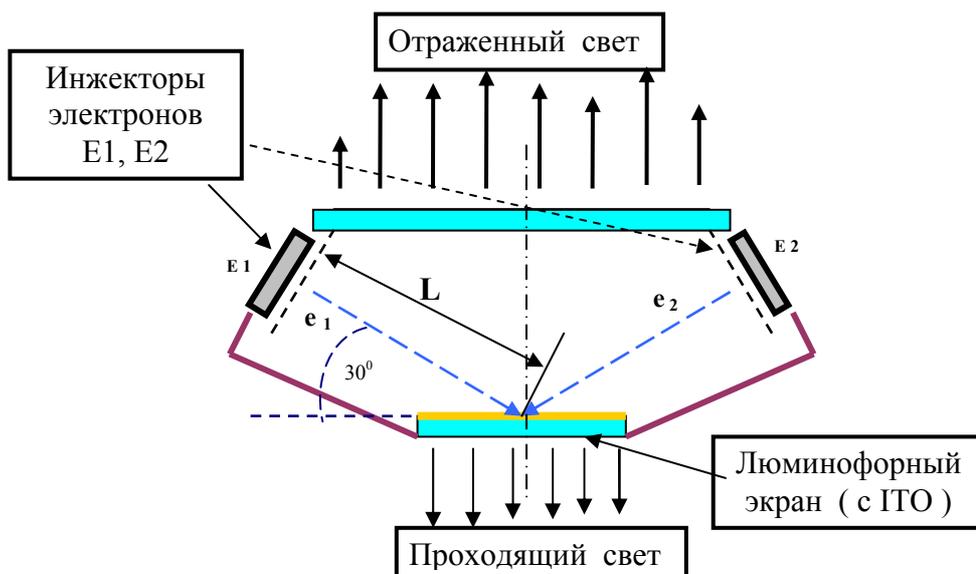


Рис. 10.

Как легко видеть, такое двухстороннее падение электронных пучков обеспечивает нам равномерную плотность нагрузки на экран. Конструктивное расположение инжекторов (под углом  $30^\circ$ ) обеспечивает достаточно широкий угол видности для отраженного светового потока. Более того, оказывается довольно удобным сравнительный анализ работы такого двунаправленного источника с характеристиками излучателя с нормальным падением пучка (рис. 1), если площадь его инжектора равна сумме площадей  $E_1$  и  $E_2$ , а длина дрейфового пространства равна  $L$ .

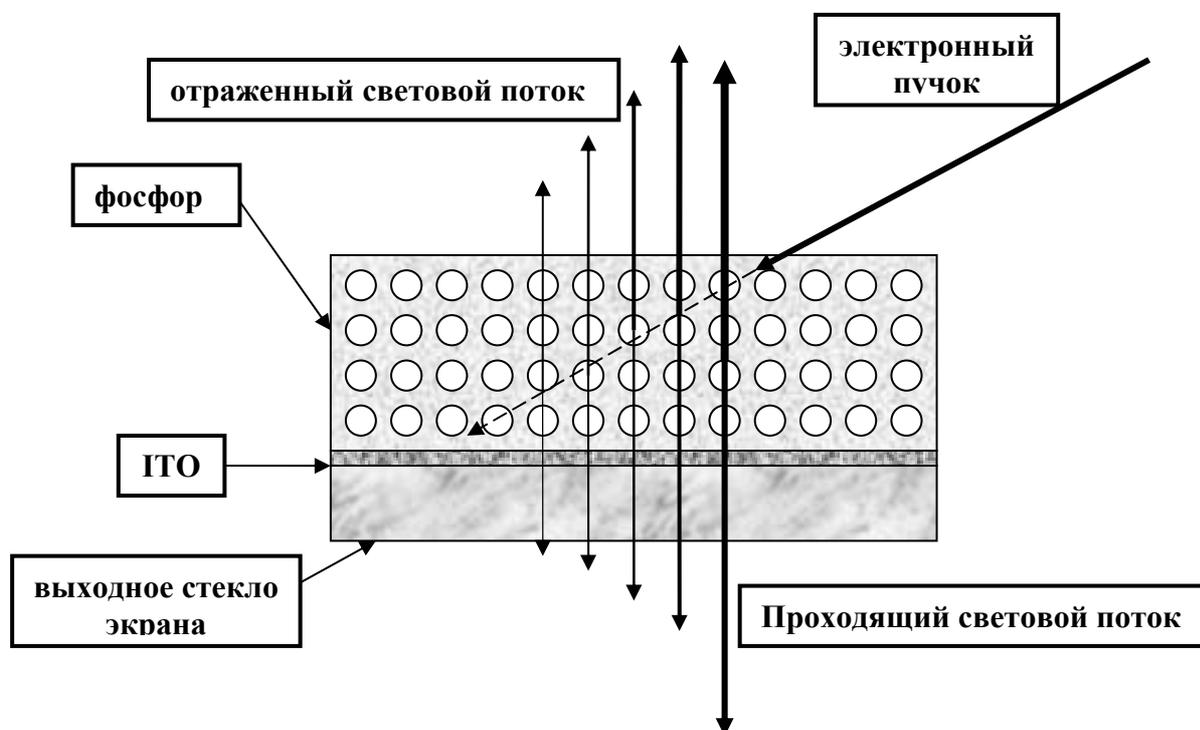


Рис 11.

Рассмотрим несколько подробнее процесс взаимодействия электронного пучка с люминофором при косом падении на поверхность экрана. Очевидно, что

характер распространения пучка в слое люминофора и световые потоки проходящего и отраженного света будут отличаться от традиционного случая нормального падения пучка (см. рис. 11).

Из рисунка видно, что большая часть энергии пучка эффективно тратится в более тонком слое фосфора (по сравнению с нормальным падением), и, следовательно, создаются условия для более интенсивного выхода фотонов отраженного света. Для проходящего света подобная сравнительная оценка не очевидна и требует дополнительного детального анализа.

Для оценки и качественного объяснения полученных световых характеристик для проходящего и отраженного световых потоков от люминофорного слоя нами была предложена простая феноменологическая модель.

Так как люминофор является весьма сложным и малоизученным объектом для теоретических исследований, мы не стали вдаваться в детали элементарных актов взаимодействия электронов с частицами фосфорного покрытия. Будем считать, что люминофор представляет собой сплошную однородную среду. Такое приближение можно использовать только в том случае, если электроны претерпевают многократные столкновения в люминофорном слое. Очевидно, что данное условие выполняется, так как характерная энергия электронов пучка примерно в тысячу раз превышает энергию высвечиваемого кванта. Введем

эффективный коэффициент поглощения электронного пучка  $\alpha_e = \frac{1}{l_e^{eff}}$ , где  $l_e^{eff}$  –

эффективная длина пробега пучка. Этот эмпирический коэффициент зависит от многих параметров, таких как энергия пучка, сорт люминофора, способ напыления люминофора и т.д. Тогда можно записать хорошо известный закон Бэра-Ламберта:

$$J_e(x) = J_e^0 \cdot \exp(-\alpha_e \cdot x), \quad (1)$$

где  $J_e(x)$  – плотность потока энергии электронного пучка в точке  $x$ ,  $J_e^0$  – плотность потока энергии электронного пучка перед люминофорным покрытием.

Введем аналогичный эффективный коэффициент поглощения  $\alpha_p = \frac{1}{l_p^{eff}}$  для излучаемых фосфором фотонов. Учитывая, что интенсивность излучения пропорциональна поглощенной плотности потока энергии электронного пучка (проще говоря, чем больше электронов рассеется в люминофоре, тем больше фотонов он высветит), запишем уравнение для интенсивности излучения в элементарном слое  $dx$ :

$$dI(x) = \gamma \cdot J(x) \cdot \alpha_e \cdot dx = \gamma \cdot J_e^0 \cdot \exp(-\alpha_e \cdot x) \cdot \alpha_e \cdot dx, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – эффективность возбуждения оптического кванта,  $dI(x)$  – интенсивность возбуждаемого излучения в точке  $x$ . Однако нас интересует интенсивность света выходящего с поверхности катодолуминесцентного экрана. Пусть  $I_{ref}$  – интенсивность «отраженного» излучения, а  $I_{pass}$  – интенсивность «прошедшего» излучения, тогда

$$dI_{pass} = \xi \cdot [A \cdot \exp\{-\alpha_e \cdot x\} \cdot \alpha_e \cdot dx] \cdot \exp\{-\alpha_p \cdot (d-x)\}, \quad (3)$$

$$dI_{ref} = [A \cdot \exp\{-\alpha_e \cdot x\} \cdot \alpha_e \cdot dx] \cdot \exp\{-\alpha_p \cdot x\}. \quad (4)$$

где  $d$  – толщина люминофора,  $A$  – коэффициент, включающий в себя геометрический фактор, энергию электронного пучка перед люминофором и т.д.,  $\xi$  – фактор учитывающий поглощение в проводящем слое ИТО ( $\xi \sim 0.8$ ). Проинтегрировав (3) и (4) от нуля до  $d$ , получим:

$$I_{pass} = \xi \cdot \frac{A \cdot \alpha_e \cdot \exp\{-\alpha_p \cdot d\}}{\alpha_e - \alpha_p} (1 - \exp\{-(\alpha_e - \alpha_p) \cdot d\}) \quad (5)$$

$$I_{ref} = \frac{A \cdot \alpha_e}{\alpha_e + \alpha_p} \left( 1 - \exp\{-(\alpha_e + \alpha_p) \cdot d\} \right) \quad (6)$$

На рисунке 12 представлены зависимости  $I_{pass}$  и  $I_{ref}$  от толщины люминофора. Параметр  $\alpha_p$  оценивался экспериментально. Параметр  $\alpha_e$  выбирался так, чтобы отношение интенсивностей «отраженного» и «прошедшего» световых потоков совпадало с экспериментальными значениями.

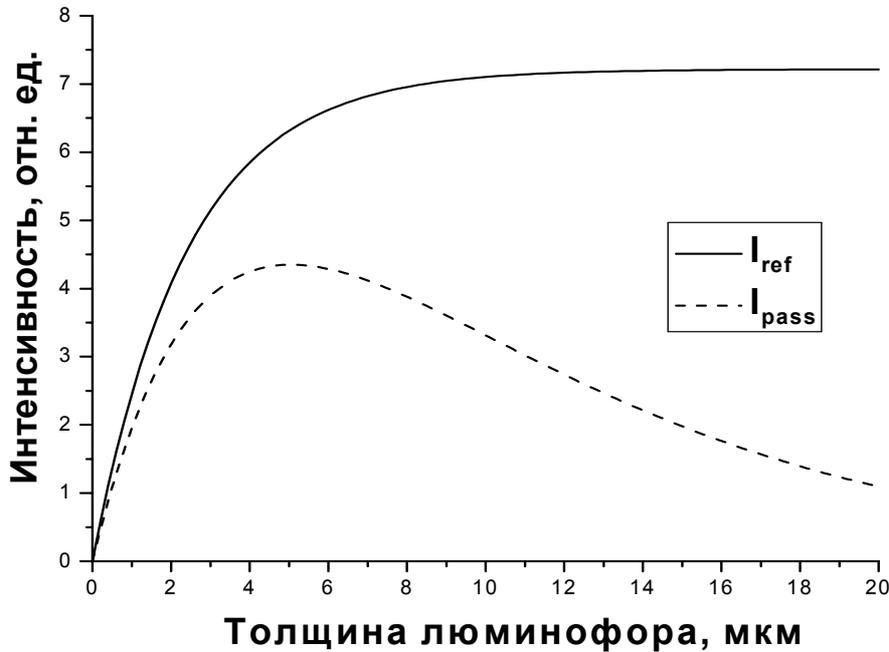


Рис. 12. Зависимость интенсивностей «отраженного» и «прошедшего» световых потоков от толщины люминофора.

Очевидно, что использование «отраженного» света позволит значительно увеличить эффективность прибора. Так как традиционная схема фронтального расположения инжектора электронов и катодолюминесцентного экрана не позволяет использовать «отраженный» свет, нужно принципиально изменять конструкцию источника света.

Оценим эффективность двунаправленного источника света, изображенного на рисунке 10, используя нашу модель. Для «косого» падения электронного пучка формулы (5) и (6) преобразуются:

$$I_{ref}(\pi/3) = \frac{2 \cdot \cos(\pi/3) \cdot A \cdot \alpha_e}{\alpha_e + \alpha_p \cdot \cos(\pi/3)} \left( 1 - \exp\left\{ - \left( \frac{\alpha_e}{\cos(\pi/3)} + \alpha_p \right) \cdot d \right\} \right) \quad (7)$$

$$I_{pass}(\pi/3) = \xi \cdot \frac{2 \cdot \cos(\pi/3) A \cdot \alpha_e \cdot \exp\{-\alpha_p \cdot d\}}{\alpha_e - \alpha_p \cdot \cos(\pi/3)} \left( 1 - \exp\left\{ - \left( \frac{\alpha_e}{\cos(\pi/3)} - \alpha_p \right) \cdot d \right\} \right) \quad (8)$$

На рисунке 13 представлены зависимости интенсивностей «отраженного» и «проходящего» света для нормального падения электронного пучка и падения под углом  $\pi/3$ . Хорошо видно, что для получения максимальной эффективности следует выбирать толщину люминофорного покрытия  $\sim 4$  мкм. Технологические особенности напыления люминофоров не позволяют качественно делать такие тонкие покрытия. В реальности мы имеем возможность использовать фосфорные экраны толщиной  $d > 7$  мкм. Но даже в этом случае эффективность предлагаемого источника света должна быть примерно в три раза выше аналогичного источника с традиционным фронтальным расположением. Принимая во внимание то, что эффективность

последнего достигает 20 лм/Вт (без Al-покрытия люминофорного слоя экрана), мы имеем основания полагать, что эффективность двухстороннего источника света будет достигать 60 лм/Вт.

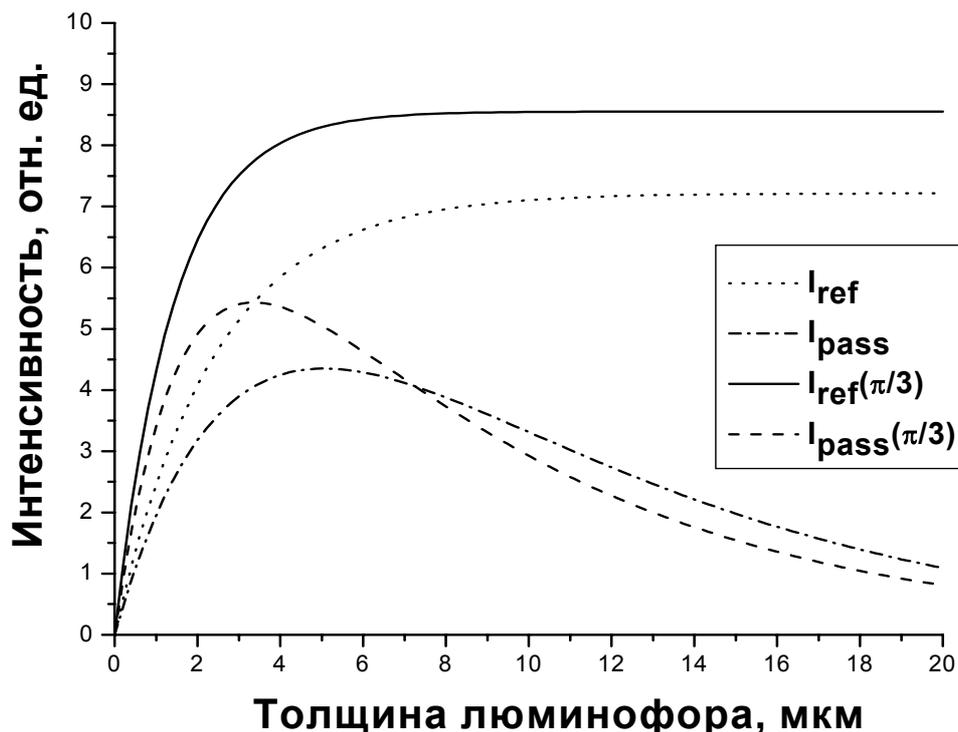


Рисунок 13. Зависимости интенсивностей «отраженного» и «проходящего» света для нормального падения электронного пучка и падения под углом  $\pi/3$ .

Таким образом, в данной работе нами предложен принципиально новый катодолюминесцентный источник света, в котором наряду с проходящим световым потоком через экран излучателя дополнительно используется «отраженный» свет от поверхности люминофора, на которую непосредственно направлен (падает) электронный пучок.

Предложена оригинальная конструкция такого светового источника, которая позволяет в достаточной степени использовать «отраженный» свет и обеспечивает однородность энергетической нагрузки на люминофорное покрытие.

Рассмотрен возможный механизм распространения электронного пучка средних энергий в люминофорном слое и проведены оценки проходящего и «отраженного» световых потоков для предложенного конструктивного исполнения излучателя. Результаты проведенного анализа позволяют надеяться, что такой двунаправленный световой источник, обладая достаточно высокой эффективностью и яркостью, может оказаться перспективным для решения целого ряда прикладных задач светотехники.

#### Возможные области использования двунаправленных источников света.

Предложенная конструкция катодолюминесцентного источника света может иметь вполне определенную целевую область применения, когда имеется необходимость (и возможность) одновременного использования двух световых потоков в разных направлениях. Так, например, возможно использовать такие излучатели для освещения улиц и различных объектов.

## ЛИТЕРАТУРА:

- [1] *Бохан П.А., Сорокин А.Р.* / ЖТФ, **55**, №1, (1985), с. 88 – 95.
- [2] *Муратов Е.А., Рахимов А.Т., Суетин Н.В.* / Патент РФ2155416, (2002); Патент US6005343, (1999).
- [3] *Муратов Е.А., Рахимов А.Т., Суетин Н.В.* / ЖТФ, **74**, вып.5, (2004), с. 121-124.  
*E.A. Muratov, A.T. Rakhimov, Suetin N.V.* / Technical Phys., vol.**49**, n 5, 2004, pp. 638-641.
- [4] *A.S.Kovalev, Yu.A.Mankelevich, E.A.Muratov et al* / J.Vac. Sci. Tech **A 10(4)**, 1992, p. 1086–1091.
- [5] N.N. Chubun, A.G. Sakhovskoi, C.E. Hunt . University of California at Davis, CA, 95616, USA (web: [http://ifes2002.univ-lyon1.fr/Abstracts/EA\\_116.pdf](http://ifes2002.univ-lyon1.fr/Abstracts/EA_116.pdf)).

**Сергей Георгиевич Белостоцкий  
Евгений Анатольевич Муратов  
Дмитрий Викторович Лопаев  
Александр Турсунович Рахимов  
Владимир Борисович Саенко**

**КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА БОЛЬШОЙ ЯРКОСТИ И  
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ СВЕТООТДАЧИ ЛЮМИНОФОРНОГО  
ПОКРЫТИЯ.**

Препринт НИИЯФ МГУ –2004 –21/760

Работа поступила в ОНТИ 23. 11. 2004 г.

ИД № 00545 от 06.12.1999

Издательство  
Учебно-научного центра довузовского образования

117246, Москва, ул. Обручева, 55А, УНЦ ДО  
Тел./факс. (095) 718-6966, 718-7785  
e-mail: [izdat@abiturcenter.ru](mailto:izdat@abiturcenter.ru)  
<http://www.abiturcenter.ru/izdat/>

Заказное. Подписано к печати 02.09. 2004г. Формат 60x90/16  
Бумага офсетная № 2. Усл. печ. л 1,12  
Тираж 50 экз. Заказ № 713

Отпечатано в Мини-типографии УНЦ ДО  
<http://abiturcenter.ru/print>  
в полном соответствии с качеством  
предоставленного оригинала-макета