

Расчет и оптимизация предельных характеристик одноканального двухспектрального приемника изображений объектов, излучающих в ультрафиолетовом диапазоне

© П.А. Золотухин, Э.А. Ильичев, Г.Н. Петрухин, А.В. Попов, Г.С. Рычков, Е.Г. Тверовская

Национальный исследовательский университет „Московский институт электронной техники“,
124498 Москва, Зеленоград, Россия
e-mail: edil44@mail.ru, alexcoretex@gmail.com

Поступило в Редакцию 12 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 12 апреля 2022 г.

Принято к публикации 18 мая 2022 г.

Предложен и теоретически исследован одноканальный двухспектральный приемник изображений объектов, излучающих в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, выполненный в архитектуре электронно-оптического преобразователя. С использованием программного пакета COMSOL Multiphysics осуществлен поиск оптимальных значений потенциалов на активных элементах приемника изображений (кремниевой мембране, германиевом и алмазном фотокатодах, входном и выходном электродах микроканальной пластины), обеспечивающих возможность регистрации и распознавания УФ объектов в привязке к окружающей местности.

Ключевые слова: электронно-оптический преобразователь, алмазный фотокатод, германиевый фотокатод, ультрафиолетовое излучение, приемник изображений объектов, фотоэлектронная эмиссия, вторичная эмиссия электронов.

DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52938.97-22

Введение

В настоящее время актуальным является запрос на разработку одноканального двухспектрального приемника изображений объектов, излучающих в ультрафиолетовом диапазоне (далее УФ объект, спектральный диапазон чувствительности 180–255 nm), в привязке к окружающей местности. Формирование изображений УФ объекта и окружающей местности осуществляется единой оптической системой линз на основе ВаF₂, фокальные плоскости которых, с изображениями УФ объекта и окружающей местности разнесены в пространстве на расстояние ~ 1 mm. В фокальных плоскостях линзы располагают алмазный и германиевый фотокатоды, соответственно. Алмазный фотокатод регистрирует изображение объекта, излучающего в УФ диапазоне (0.18–0.25 μ m) [1,2], а изображение окружающей местности регистрируется в отраженном излучении ночного неба в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне (0.8–1.5 μ m). Предлагаемый приемник изображений может быть использован при решении широкого круга задач. В их числе: бесконтактный мониторинг технического состояния высоковольтных электроэнергетических объектов с целью раннего обнаружения технических неисправностей высоковольтного оборудования (по регистрации „частичных“ и „коронных“ разрядов); диагностика состояния контактных цепей трансформаторных подстанций и контактных сетей железных дорог; бесконтактный мониторинг территорий, загрязненных радиоактивными веществами.

Предлагаемая конструкция одноканального двухспектрального приемника изображений УФ объектов, выполненного в архитектуре ЭОП, представлена на рис. 1.

Упомянутый приемник интегрирует в себе последовательность совокупности ряда физических эффектов и процедур. В их числе: формирование оптической системой изображений УФ объекта и окружающей местности в плоскости алмазного и германиевого фотокатодов, соответственно; преобразование оптических изображений УФ объекта и окружающей местности в изображения в потоках электронов; усиление совокупного изображения в потоках электронов, несущего информацию об объекте и окружающей его местности, осуществляемое в микроканальной пластине (МКП) посредством эффекта вторичной эмиссии электронов; преобразование картины изображений в потоке электронов в картину изображений видимой части оптического диапазона посредством катодоллюминесценции.

Изображение объекта (180–255 nm) проецируется системой ВаF₂ линз в плоскость алмазного фотокатода, поглощается его веществом и пропорционально интенсивности излучения преобразуется в изображение в фотоэлектронах. Изображение местности, окружающей УФ объект, сформированное в отраженном ИК излучении ночного неба (0.8–1.55 μ m), также проецируется системой ВаF₂ линз, но уже в плоскость германиевого фотокатода, поглощается его веществом и, пропорционально интенсивности ИК излучения, преобразуется в изображение в фотоэлектронах. Разнесение в про-

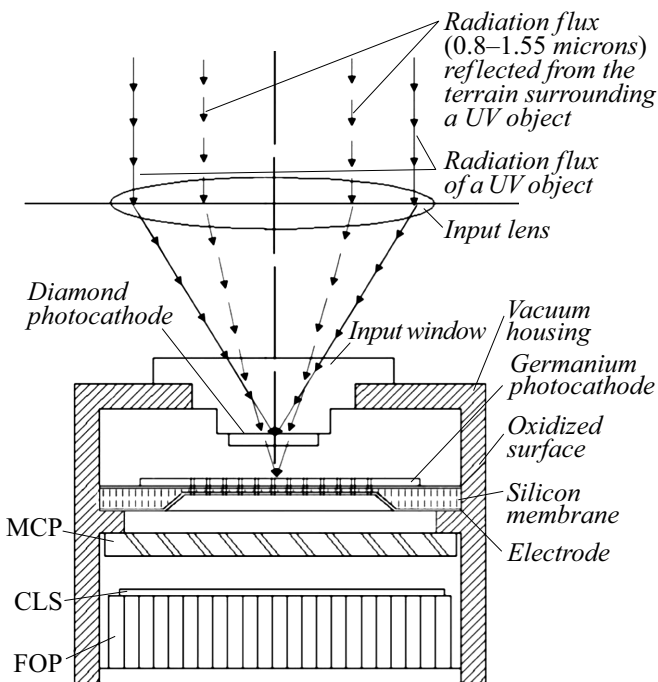


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции одноканального двухспектрального приемника изображений УФ объектов в привязке к окружающей местности, выполненного в архитектуре ЭОП.

странстве фокальных плоскостей изображений объектов, излучающих в УФ диапазоне, и изображений окружающей местности обеспечивается геометрией линз и разницей показателей преломления их вещества (BaF_2) по отношению к указанным (ИК и УФ) спектральным диапазонам регистрируемых излучений. Это позволяет разнести в пространстве их фокальные плоскости на практически удобные для реализации прибора расстояния ~ 1 мм. Таким образом, оптические изображения УФ объекта и окружающей УФ объект местности преобразуются в изображения в фотоэлектронах, суперпозиция потоков которых считывается в направлении МКП, сквозь соосно расположенные отверстия в германиевом фотокатоде и в несущей его кремниевой мембране. Результирующее изображение в потоках электронов усиливается МКП за счет эффекта вторичной эмиссии электронов, ускоряется в вакуумном промежутке полем разности потенциалов между выходным электродом МКП и катодолуминесцентным экраном (КЛЭ) и затем проецируется на КЛЭ. Изображения УФ объекта на фоне окружающей местности, поступающие на КЛЭ в виде усиленного потока электронов, пропорционально преобразуются в изображения в потоках фотонов видимой части оптического диапазона. Результирующие изображения выводятся из корпуса прибора посредством волоконно-оптической пластины (ВОП), и могут считываться как визуально, так и посредством прибора с зарядовой связью — ПЗС приемника, вход-

ное окно которого связывают с ВОП иммерсионной средой.

Эффективность обсуждаемого одноканального двухспектрального инновационного приемника изображений объектов, излучающих в УФ диапазоне в привязке к изображению окружающей местности, будет определяться качеством интеграции в приборе перечисленных физических эффектов и оптимальным выбором управляющих потенциалов на его базовых элементах.

1. Модельные представления и результаты расчетов

Анализ характера и степени влияния особенностей конструкции и режимов питания на эффективность прибора необходим для выбора и согласования величин потенциалов фотокатодов и считывающего узла (кремниевая мембрана и входной электрод МКП) приемника изображений. В процессе анализа и расчетов нами использовались известные функциональные зависимости и физические представления, развитые в исследованиях вышеупомянутых физических эффектов.

При расчетах напряженности электрических полей, влияющих на поток фотоэлектронов, использовано уравнение (1), описывающее связь электрических полей и потенциалов:

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi, \quad (1)$$

где \mathbf{E} является суперпозицией электрических полей:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{DPH} + \mathbf{E}_{GPh} + \mathbf{E}_{Si} + \mathbf{E}_{MCP} + \mathbf{E}_{coulomb}. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{E}_{DPH} — напряженность электрического поля от потенциала алмазного фотокатода, \mathbf{E}_{GPh} — напряженность электрического поля от потенциала германиевого фотокатода, \mathbf{E}_{Si} — напряженность электрического поля от потенциала кремниевой мембраны, \mathbf{E}_{MCP} — напряженность электрического поля от потенциала входного электрода МКП, $\mathbf{E}_{coulomb}$ — напряженность электрического поля, связанного с кулоновским взаимодействием электронов между собой. Последнее описывается выражением

$$\mathbf{E}_{coulomb} = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^n \mathbf{E}_{ij} = \frac{1}{2} \frac{1}{q} \sum_{i,j}^n k \frac{q_i q_j}{r_{ij}^3} \mathbf{r}_{ij}, \quad (3)$$

где \mathbf{E}_{ij} — электрическое поле между i и j -м электроном, q_i и q_j — заряд i и j электрона, k — кулоновский коэффициент, \mathbf{r}_{ij} — радиус-вектор между i и j -м электроном; суммирование происходит по каждому i и j элементу, при этом $i \neq j$ и $\mathbf{E}_{ij} = \mathbf{E}_{ji}$.

Для описания преломления электрических полей на границе двух сред в МКП с диэлектрической проницае-

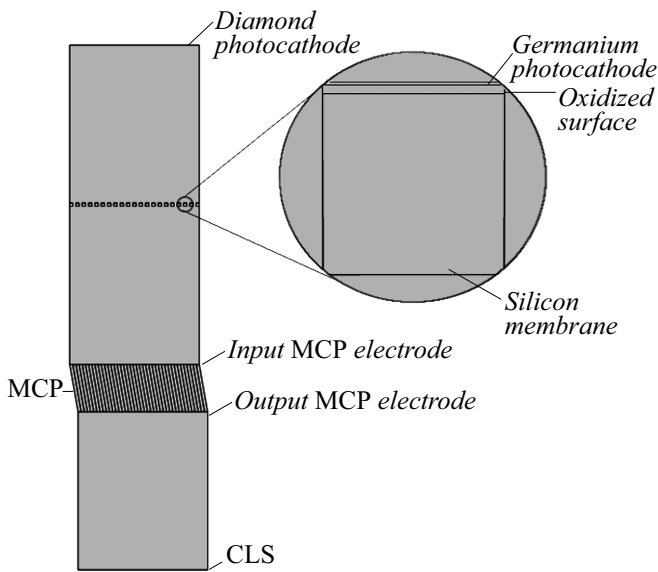


Рис. 2. Схематическое изображение оптического тракта одноканального двухспектрального приемника изображений объектов, излучающих в УФ диапазоне, в привязке к окружающей местности.

мостью ϵ_1 и ϵ_2 использовалось уравнение

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 — углы между нормалью к плоскости границы двух сред и вектором электрического поля, находящегося в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и ϵ_2 соответственно.

Для описания влияния электрического поля на траектории потока фотоэлектронов, используется уравнение (5):

$$q\mathbf{E} = m_e \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad (5)$$

где q — элементарный заряд, m_e — масса электрона и \mathbf{v} — скорость электрона.

При расчетах коэффициента умножения потока электронов в МКП использовано выражение (6), дающее возможность получить оценку числа рожденных (в одном цикле) вторичных электронов при взаимодействии первичных электронов с веществом МКП:

$$n_{\text{secondary}} = \frac{E_{\text{primary}}}{E_{\text{pair form}}}, \quad (6)$$

где E_{primary} — энергия „первичного“ электрона в каждом цикле взаимодействий в канале МКП, $E_{\text{pair form}}$ — пороговая энергия образования неравновесной пары электрон–дырка.

При анализе процессов удельных потерь энергии электронами, совершаемых при обратном преобразовании сформированных в ЭОП изображений в потоках электронов в изображения в видимой части оптического диапазона, используется уравнение Бете (функциональная зависимость удельных потерь энергии по

ионизационному механизму при взаимодействии легких высокоэнергетических частиц с веществом) [3,4].

Интегрирование последовательности перечисленных выше физических эффектов позволило сформировать модельные представления и изучить процессы преобразований и считываний изображений в базовых узлах, и в целом в одноканальном двухспектральном приемнике изображений объектов в привязке к изображению местности, окружающей УФ объект.

В настоящей работе выполнен теоретический анализ и численные расчеты управляющих потенциалов, необходимых для реализации процесса корректного считывания информации об УФ объекте и окружающей его местности. Рассмотрена стационарная задача (т.е. ситуация со стационарными потоками электронов). Объектом исследований и анализа является приемник УФ изображений в составе следующих базовых узлов: алмазного фотокатода (диапазон спектральной чувствительности 180–255 нм); германиевого фотокатода (диапазон спектральной чувствительности 0.8–1.55 мкм), расположенного на окисленной поверхности мембраны утоненной кремниевой пластины; микроканальной пластины (МКП); КЛЭ (рис. 2).

1.1. Оптимизация потенциала на алмазном фотокатоде

При оптимизации величины управляющего потенциала на алмазном фотокатоде необходимо обеспечить баланс энергий между двумя потоками фотоэлектронов: электронным потоком, несущим информацию об УФ объекте, и электронным потоком, несущим информацию об окружающей объект местности. Необходимый баланс энергий электронных потоков формируется потенциалами на фотокатодах, на несущей германиевый фотокатод утоненной кремниевой мембране с поверхностью, покрытой SiO_2 , и на входном электроде МКП. Их совокупность должна обеспечить эффективное считывание картины изображений объекта и местности в суперпозиции электронных потоков сквозь соосные отверстия в германиевом фотокатоде и упомянутой несущей его кремниевой мембране.

При потенциале на входном электроде МКП ~ 300 В, величине потенциала на утоненной кремниевой мембране ~ 1 В, ее толщине ~ 35 мкм и потенциале на германиевом фотокатоде -0.45 В рассчитана (и ниже, в виде графика, представлена) зависимость от потенциала на алмазном фотокатоде среднего числа фотоэлектронов, дошедших до МКП и спроецированных в растр отверстий любого из его каналов (рис. 3).

Представленная выше функциональная зависимость позволяет выбрать оптимальную величину управляющего потенциала на алмазном фотокатоде; эта величина оказывается в диапазоне $(-4) - (-5)$ В. Дальнейшее увеличение отрицательного потенциала на электроде алмазного фотокатода приводит к снижению среднего числа

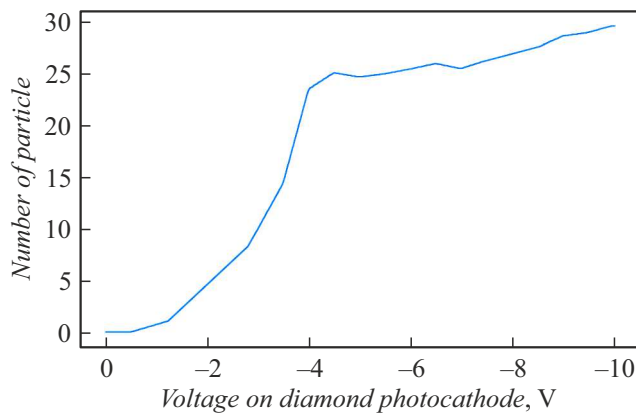


Рис. 3. Влияние электрического потенциала фотокатода на среднее число фотоэлектронов, дошедших до МКП и спроецированных в растр любого из отверстий его каналов.

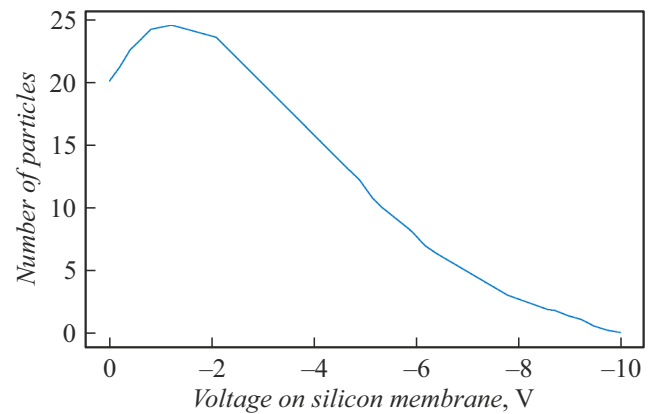


Рис. 4. Зависимость среднего числа фотоэлектронов, дошедших до МКП и спроецированных в растр любого из отверстий его каналов, от величины потенциала на кремниевой мембране.

фотоэлектронов дошедших до МКП и спроецированных в растр отверстий любого из его каналов.

1.2. Оптимизация потенциала на кремниевой мембране

Положительный потенциал кремниевой мембраны обеспечивает прохождение суперпозиции информационных потоков фотоэлектронов сквозь соосные отверстия в кремниевой несущей мембране и в германиевом фотокатоде. Поиск оптимального потенциала на кремниевой мембране связан с поиском баланса полей от потенциалов на упомянутых элементах, обеспечивающих прохождение с минимальными потерями потоков фотоэлектронов в соосно расположенные отверстия в кремниевой мембране и в германиевом фотокатоде. На рис. 4 построена зависимость среднего числа фотоэлектронов, проецируемых в растр каждого канала МКП, от величины электрического потенциала кремниевой мембраны. При расчетах потенциал на алмазном фотокатоде был выбран равным -4.5 В, с учетом результатов представленных на рис. 3.

Информация, представленная на рис. 4, показывает, что оптимальная величина потенциала на кремниевой мембране находится в диапазоне $1.5-2.0$ В, что соответствует экстремуму функциональной зависимости числа фотоэлектронов, прошедших сквозь отверстия в кремниевой мембране. Наличие экстремума у этой функциональной зависимости связано с тем, что в указанном диапазоне напряжений, при заданной геометрии, реализуется баланс электрических полей, обеспечивающих формирование траекторий фотоэлектронов коллинеарных осей симметрии каналов мембраны. При потенциалах, меньших 1.5 В, напряженность поля электрического потенциала недостаточна для направления и „втягивания“ доминирующего числа электронов потока сквозь отверстия в германиевом фотокатоде и кремниевой

мембране. Напротив, при потенциалах более 2 В среднее число фотоэлектронов, дошедших до входного электрода МКП, монотонно уменьшается с ростом напряжения, что связано с неколлинеарностью траекторий фотоэлектронов осей симметрии каналов мембраны и, как следствие, с комбинацией фотоэлектронов на стенках каналов кремниевой мембраны.

На рис. 5 и 6 представлены картины траекторий фотоэлектронов и распределений потенциалов в пространстве между алмазным и германиевым фотокатодами, при различных величинах электрических потенциалов на кремниевой мембране.

Представленные результаты позволяют проследить особенности перемещений и взаимодействий потоков электронов и выбрать оптимальные режимы формирования траекторий электронов суперпозиции потоков.

Выполнены оценки среднего числа захваченных кремниевой мембраной фотоэлектронов (рекомбинационные потери) при различных величинах электрических потенциалов. Результаты представлены в виде графиков (рис. 7).

Наблюдается корреляция полученных (рис. 7) результатов с информацией, представленной ранее на рис. 4. Таким образом, к росту потерь электронов суммарного потока фотоэлектронов (их рекомбинации на стенках каналов) приводит чрезмерное увеличение потенциала на кремниевой мембране.

1.3. Оптимизация потенциала на входном электроде МКП

При выборе величины потенциалов на электродах МКП необходимо учитывать следующие факторы влияния. Увеличение разности потенциалов между входным и выходным электродами МКП определяет суммарный коэффициент умножения МКП потока электронов (определяет внутреннее усиление прибора), но ограничивается пределом электрической прочности веще-

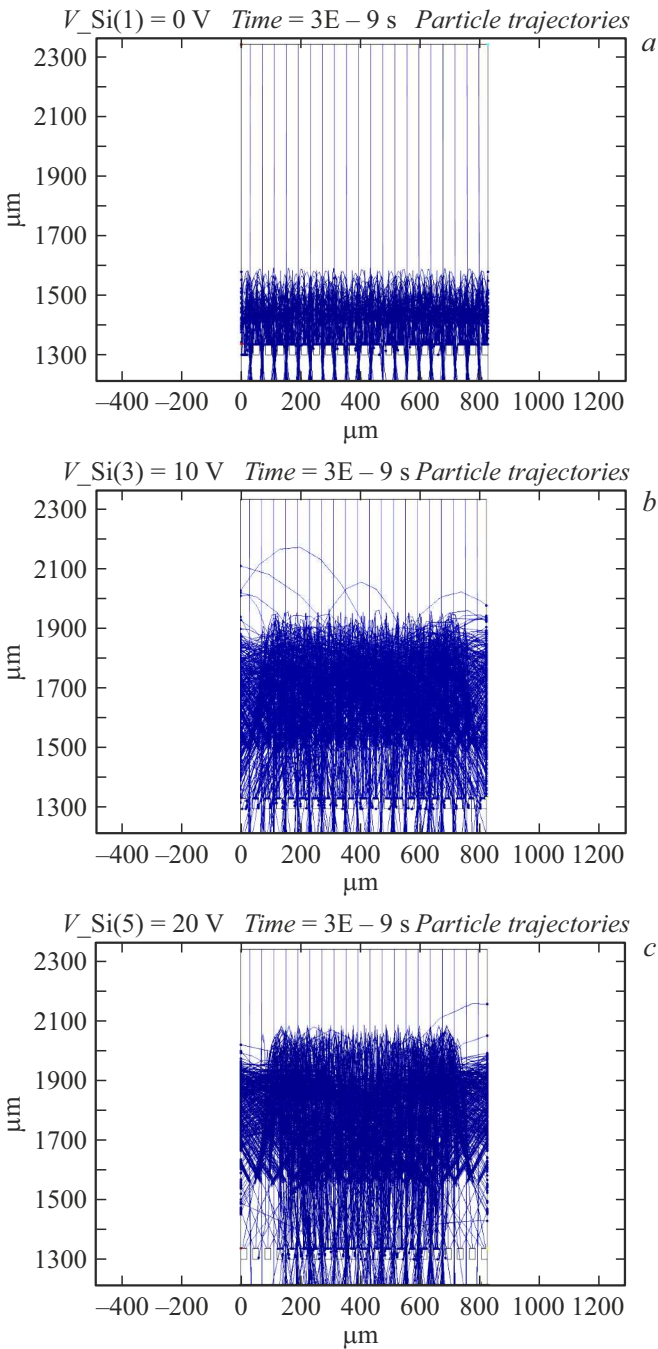


Рис. 5. Траектории электронов в пространстве между алмазным фотокатодом и кремниевой мембраной при различных величинах потенциалов на кремниевой мембране: *a* — 0, *b* — 10, *c* — 20 V.

ства МКП. Кроме того, выбор величины электрического потенциала на входном электроде МКП должен значительно превышать величину отношения $E_{\text{pair form}}/q$, где $E_{\text{pair form}}$ — энергия образования вторичных электронов, q — элементарный заряд. Менее очевидным является степень влияния величины потенциала входного электрода МКП на „расфокусировку“ электронной

картины изображения объекта и окружающей местности.

В силу сказанного, для исследования влияния потенциала входного электрода МКП на процесс формирования картины изображений рассчитаны и графически представлены (рис. 8) функциональные зависимости среднего числа фотоэлектронов, спроецированных в растр любого из отверстий каналов МКП. При этом на активных элементах прибора (кремниевой мембране, алмазном и германиевом фотокатодах)

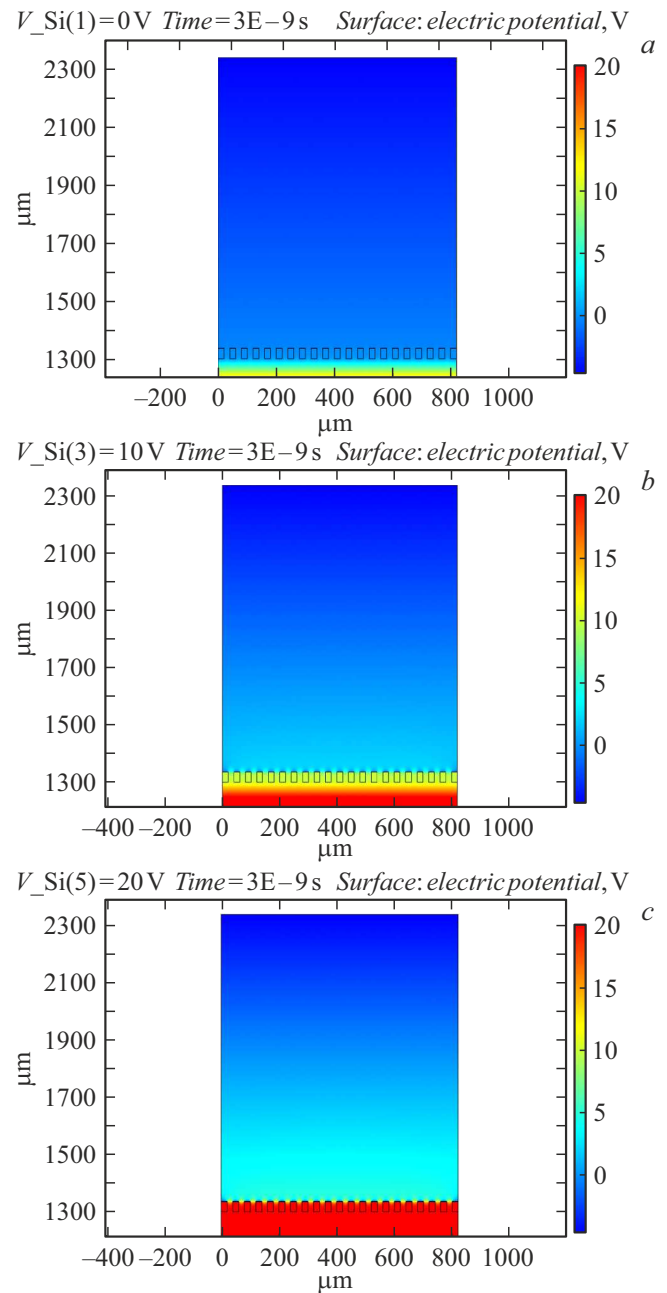


Рис. 6. Распределение потенциала в пространстве между алмазным фотокатодом и кремниевой мембраной при различных величинах потенциалов на кремниевой мембране: *a* — 0, *b* — 10, *c* — 20 V.

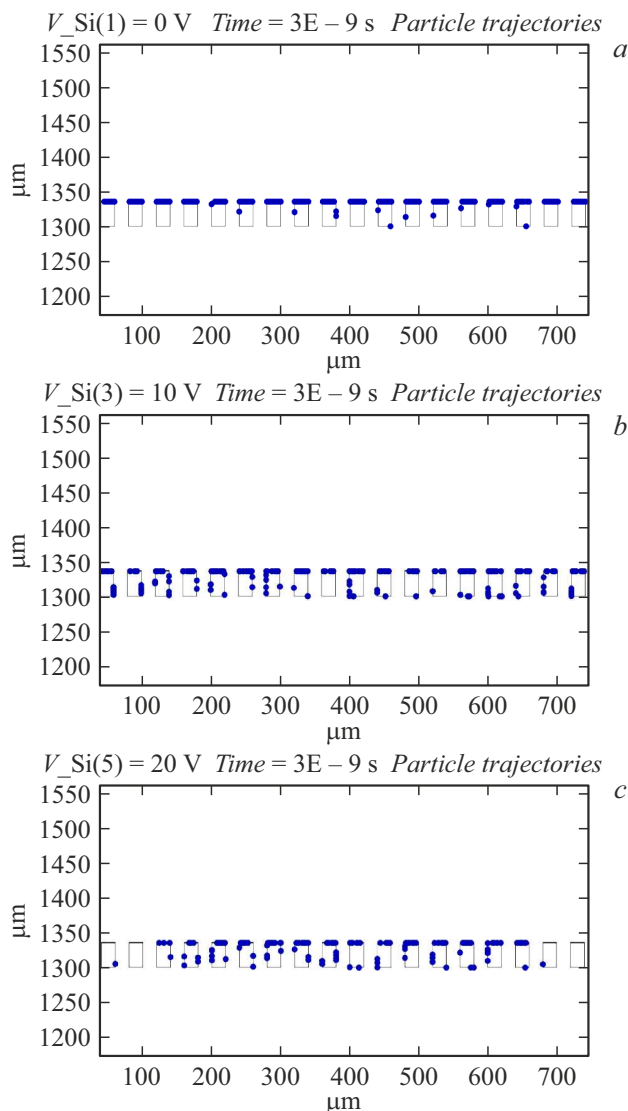


Рис. 7. Картины фотоэлектронов (синие точки (в онлайн версии)), захваченных кремниевой мембраной, при различных величинах потенциалов на кремниевой мембране: *a* — 0, *b* — 10, *c* — 20 V.

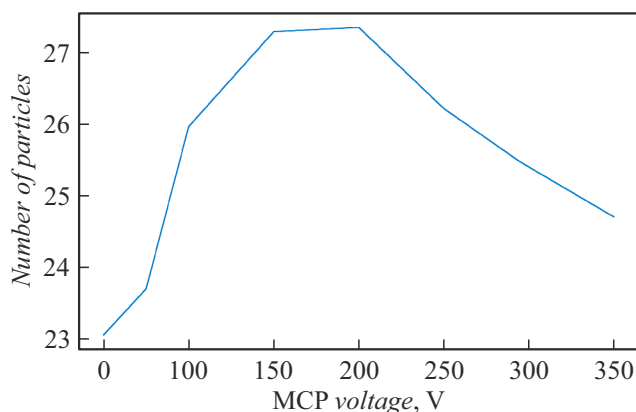


Рис. 8. Зависимость среднего числа фотоэлектронов, дошедших до МКП и спроецированных в растр площади отверстия любого из его каналов, от потенциала на входном электроде МКП.

были установлены рассчитанные выше оптимальные потенциалы (1.55, -4.5 и -0.45 V , соответственно), а разность потенциалов между электродами МКП задана величиной $\sim 1000 \text{ V}$.

Из численных расчетов, представленных на рис. 8, следует, что оптимальная величина потенциала на входном электроде МКП составляет величину $\sim 200 \text{ V}$. Дальнейшее увеличение напряжения на входном электроде МКП приводит к монотонному снижению среднего числа электронов, вошедших в любой из каналов МКП. Одна из причин — увеличение, с ростом потенциала, доли потока фотоэлектронов, уводимых от каналов на входную плоскость МКП, что приводит к рекомбинационным потерям на ее поверхности значимой части неравновесных электронов. Это подтверждается гистограммами распределений среднего числа электронов, входящих в отверстия МКП при различных потенциалах на входном электроде МКП (рис. 9): с ростом величины потенциала происходит увеличение величины стандартного отклонения и уменьшение величины оценки математического ожидания. Как показывает анализ изменений поведения траекторий фотоэлектронов от напряжения на входном электроде МКП, другой причиной потерь является „расфокусировка“ траекторий фотоэлектронов потока. Штрихом (на рис. 9) приведено гауссово распределение по величинам стандартного отклонения и математического ожидания; соответствие характеров экспериментального и гауссова распределений указывает на случайный характер процессов.

1.4. Оптимизация толщины кремниевой мембраны

Уменьшение толщины сетчатой кремниевой мембраны несущей германиевый фотокатод, приводит к уменьшению вероятности потерь электронов из-за их возможных столкновений со стенками каналов и поглощения электронов веществом кремниевой пленки. Однако с уменьшением толщины сетчатой кремниевой мембраны уменьшается ее механическая прочность, и возрастают технические сложности ее формирования. Необходимо соблюсти баланс между указанными факторами.

Процесс оптимизации толщины кремниевой мембраны осуществлялся с использованием двух различных подходов. В рамках одного подхода (рис. 2) моделировалась работа считывающего узла всего многоканального массива. В рамках второго подхода анализировалась работа считывающего узла приемника изображений посредством рассмотрения любого из отверстий в кремниевой мембране (рис. 10), что позволило значительно улучшить статистику численного эксперимента.

Модельные представления о считывающем узле мембраны с выделением только одного отверстия мы использовали для анализа функциональной зависимости

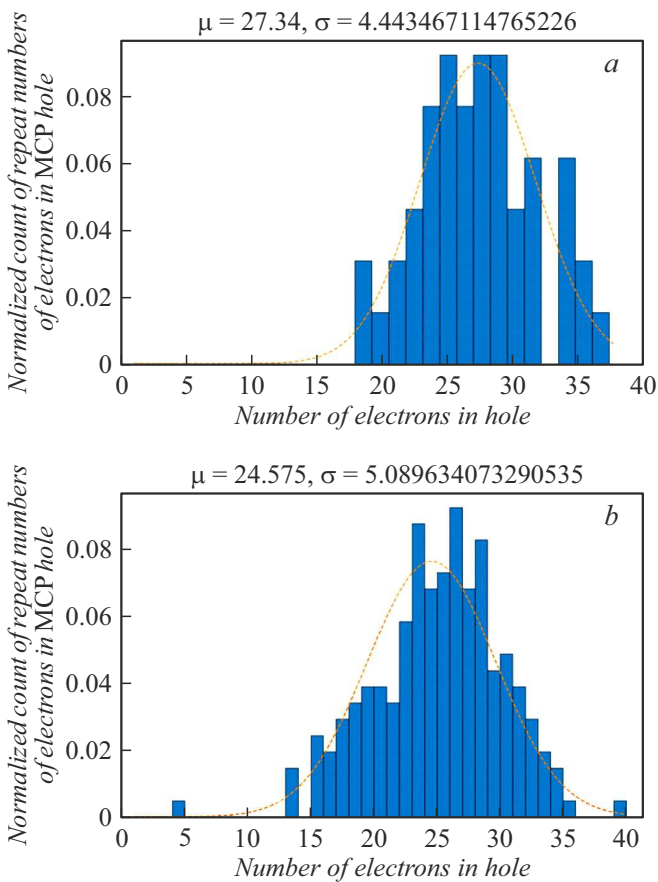


Рис. 9. Гистограммы распределения среднего числа электронов на входе любого из каналов МКП при величинах потенциалов на входном электроде МКП 200 (a) и 350 В (b).

числа выходящих из кремниевой мембраны фотоэлектронов в зависимости от ее толщины (рис. 11).

Данные модельные представления, в отличие от ранее изложенных (рис. 2), позволяют рассчитать и графически представить функциональную зависимость (рис. 11) с большей выборкой фотоэлектронов, которая составила 2000 фотоэлектронов рожденных в германиевом фотокатод. Рожденные фотоэлектроны алмазным фотокатодом слабо возмущали систему и не принимались во внимание, как величины меньшего порядка.

Представленная зависимость числа фотоэлектронов, направляемых в сторону МКП, хорошо аппроксимируется зависимостью, обратно пропорциональной толщине кремниевой мембраны. Полученный результат был использован для уточнения функциональной зависимости от толщины кремниевой мембраны среднего числа частиц, дошедших до МКП, и проецируемых на площадь любого из отверстий его каналов (рис. 12). Результаты сопоставлены с результатами расчетов полученных нами выше с использованием других модельных представлений (рис. 2).

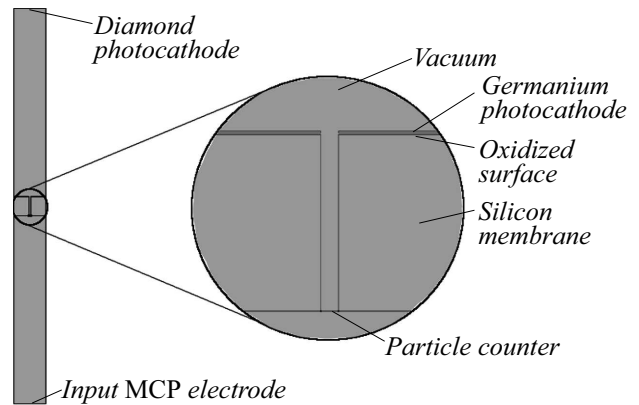


Рис. 10. Схематическое изображение модельного представления о считывающем узле приемника изображений в форме мембраны с одним отверстием, использованного при расчетах в программном пакете COMSOL Multiphysics.

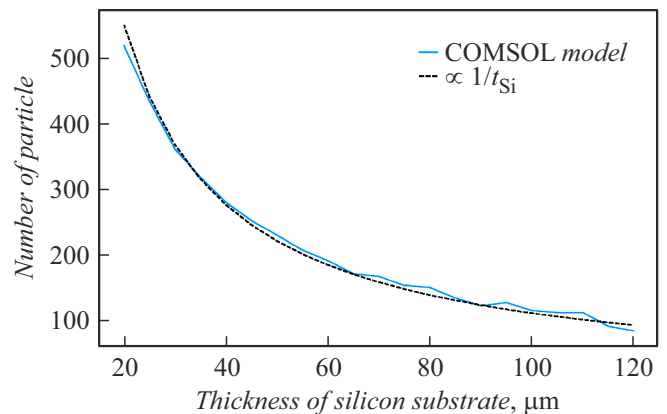


Рис. 11. Функциональная зависимость числа фотоэлектронов, прошедших кремниевую мембрану от ее толщины; штрихом изображена кривая аппроксимации.

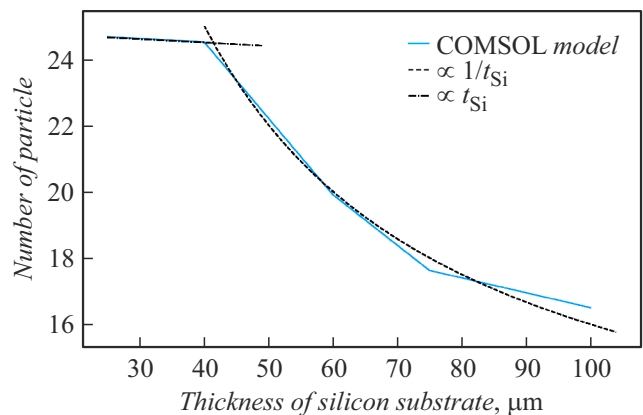


Рис. 12. Зависимость среднего числа частиц, дошедших до МКП и спроецированных в растр отверстия любого из его каналов, от толщины кремниевой мембраны.

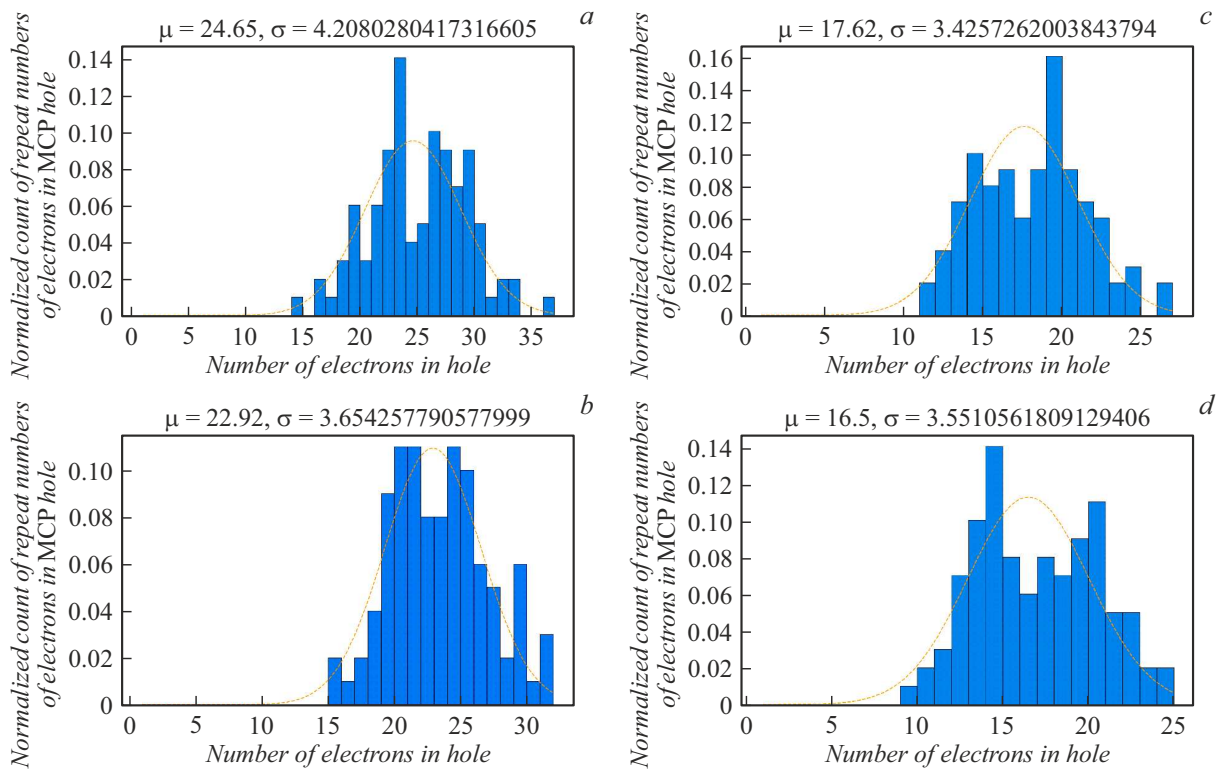


Рис. 13. Гистограммы распределения среднего числа электронов, дошедших до МКП и спроецированных в растр отверстия любого из его каналов, при различных толщинах кремниевой мембраны: *a* — 25, *b* — 50, *c* — 75, *d* — 100 μm .

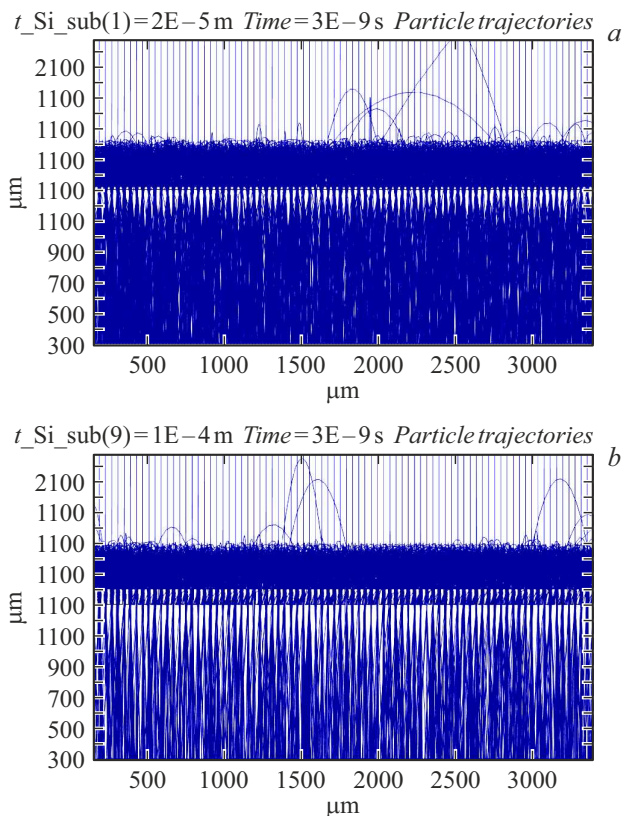


Рис. 14. Траектории фотоэлектронов в окрестности поверхности кремниевой мембраны при различных ее толщинах: *a* — 20, *b* — 100 μm .

В результате численного анализа было показано (рис. 12), что оптимальной толщиной кремниевой мембраны можно считать толщину 40–45 μm . Полученная функциональная зависимость (штриховая кривая) идентична представленной на рис. 11 для толщин кремниевой мембраны более 40 μm .

Из гистограмм, представленных на рис. 13, описывающих распределение среднего числа фотоэлектронов, попавших в растр отверстия любого из каналов МКП в зависимости от толщины кремниевой мембраны следует, увеличение ее толщины приводит к уменьшению числа фотоэлектронов (уменьшению их математического ожидания). Это можно объяснить ростом рекомбинационных потерь фотоэлектронов на стенках каналов кремниевой мембраны, несоосных осям каналов; на это указывает и одновременное уменьшение среднеквадратичного отклонения. Кроме того, уменьшение толщины кремниевой мембраны приводит к „разбалансу“ суперпозиции оптимальных полей в окрестности поверхности германиевого фотокатода и к „расфокусировке“ фотоэлектронов результирующих потоков (рис. 14, 15). Устранение разбаланса полей посредством увеличения потенциала входного электрода МКП неприемлемо, так как это приводит к увеличению потерь фотоэлектронов за счет расфокусировки потоков в пространстве кремниевая мембрана–МКП и отклонений части фотоэлектронов потока от раstra каналов на входную плоскость МКП.

Базовые параметры управляющих потенциалов приемника изображений объектов, излучающих в УФ диапазоне

Потенциал кремниевой мембраны, V	Толщина кремниевой мембраны, μm	Потенциал на электроде алмазного фотокатода, V	Потенциал на электроде германиевого фотокатода, V	Потенциал на входном электроде МКП, V	Потенциал на выходном электроде МКП, V	Потенциал на электроде люминофора, V
1–2	40–45	(–4.5)–(–5)	(–0.45)–(–0.5)	200	1200	2500

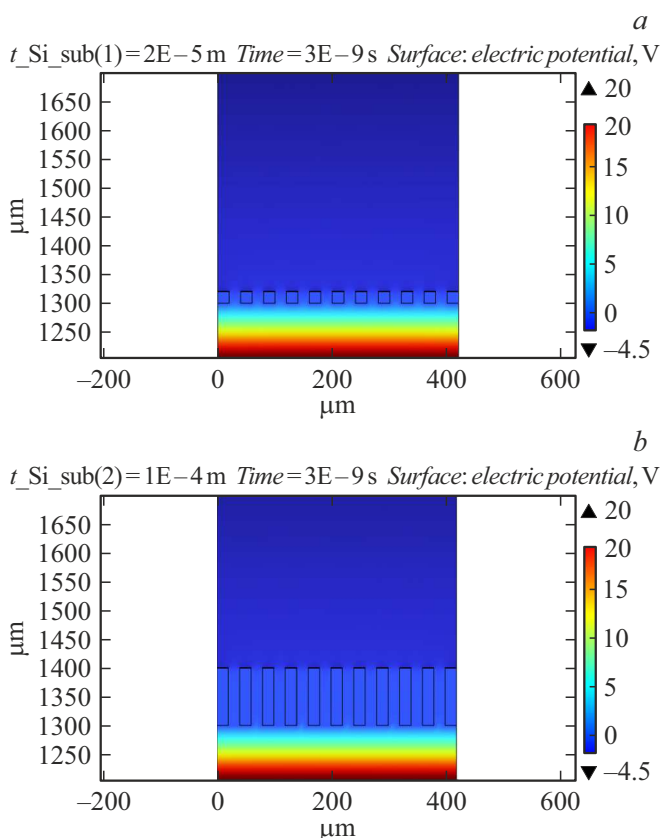


Рис. 15. Картины пространственного распределения потенциалов в окрестности поверхности кремниевой мембраны при различных ее толщинах: *a* — 20, *b* — 100 μm .

Для проверки данного заключения, были построены пространственные картины траекторий фотоэлектронов (рис. 14) и распределений пространственного потенциала в окрестности кремниевой мембраны (рис. 15).

Факты увеличения потерь электронов за счет рекомбинации на стенках каналов мембраны при увеличении ее толщины ($\geq 100\ \mu\text{m}$) ярко проявляются в картинах пространственного распределения силовых линий электрического поля (рис. 16).

Таким образом, в результате численных расчетов и анализа полученных результатов выбраны оптимальные величины потенциалов базовых элементов приемника изображений объектов, которые представлены в таблице.

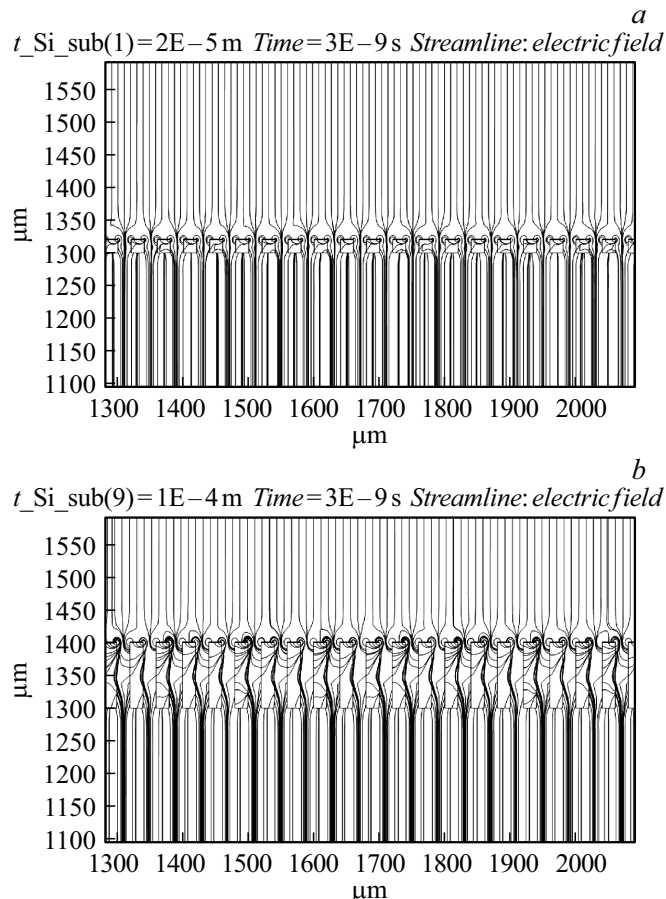


Рис. 16. Картина распределения электрического поля в окрестности поверхности кремниевой мембраны при различных ее толщинах: *a* — 20, *b* — 100 μm .

2. Исследование пространственного распределения картин изображений объекта и окружающей местности

Ниже показаны результаты исследований интегрирования одномерных модельных представлений картин изображений объектов и окружающей местности. Представлены они в формах меандра, синуса и локального объекта произвольной формы (УФ излучение), регистрируемого на фоне излучений постоянной мощности от окружающей местности (например, отраженного от местности ИК излучения ночного неба). В расчетах

использовались модельные представления о мембране с двумя сотнями (200) отверстий и многоканальной МКП.

2.1. Сигналы в форме меандров (рис. 17)

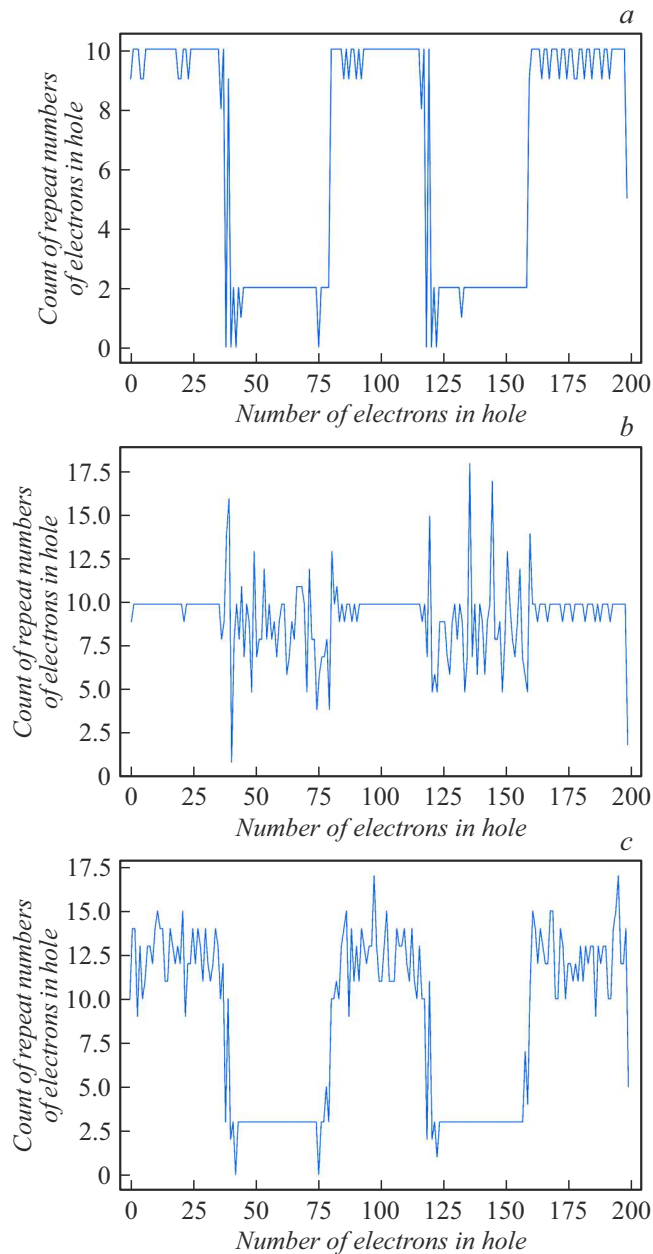


Рис. 17. Пространственные картины изображений объекта и окружающей местности, взятых в форме меандра: в отсутствие ИК сигнала от окружающей местности (а), при сигналах, взятых в противофазе (b), при одинаковых фазовых отношениях сигналов (с).

2.2. Сигналы в форме синусов (рис. 18)

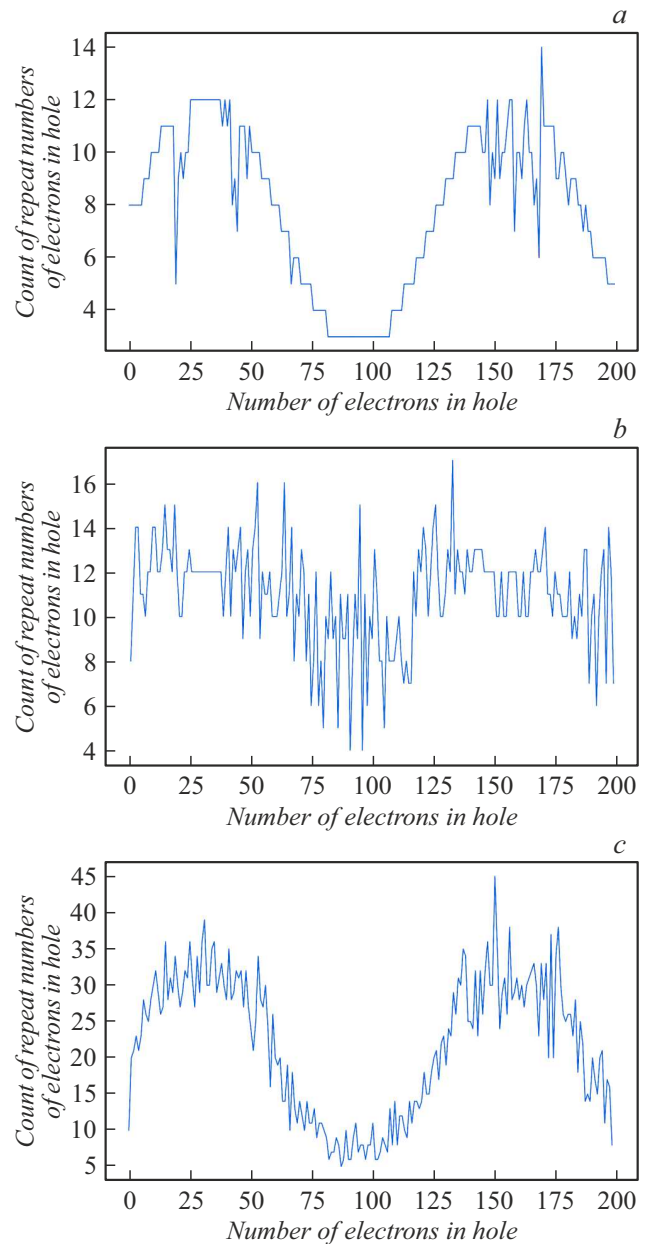


Рис. 18. Пространственные картины распределения изображений объекта и окружающей местности, взятых в форме синусов: в отсутствие ИК сигнала от окружающей местности (а), при наличии сигналов от объекта и местности противоположных фаз (b) и при наличии сигналов одинаковых фаз (с).

2.3. Регистрация и распознавание локального УФ объекта на фоне равномерного ИК потока, отраженного от окружающей местности (рис. 19)

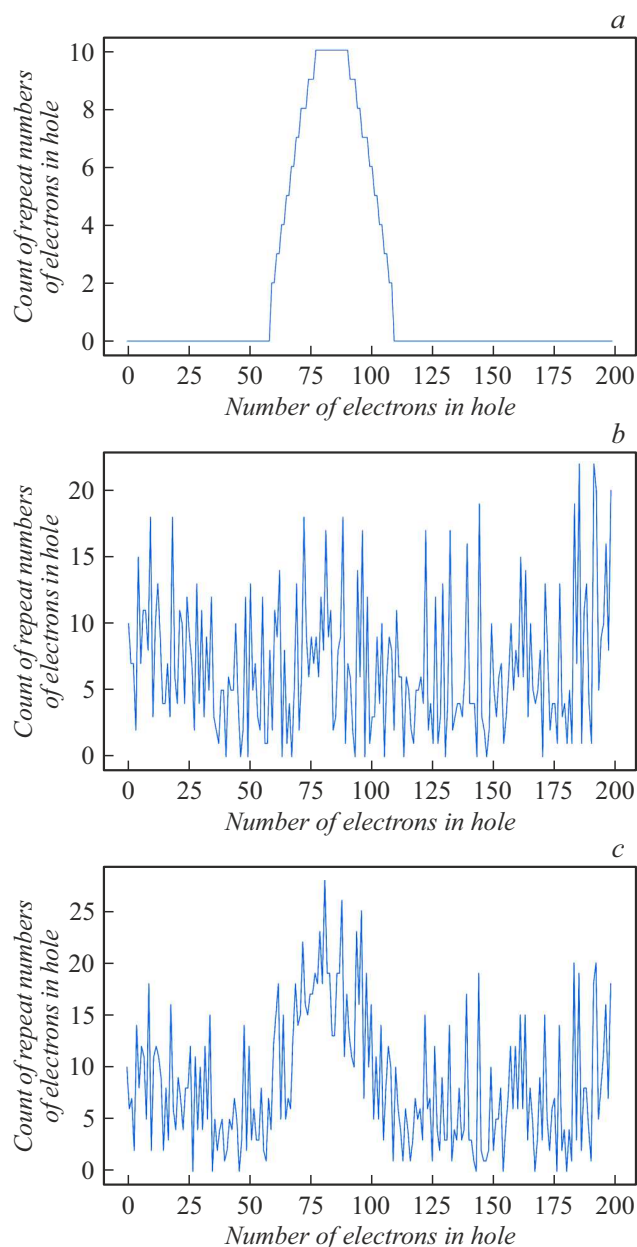


Рис. 19. Пространственные картины объекта на фоне отраженного равномерного потока ИК излучения, отраженного от окружающей местности: *a* — изображение объекта; *b* — изображение местности, *c* — суперпозиция сигналов от объекта и от местности.

Заключение

Предложена конструкция одноканального двухспектрального эмиссионного приемника изображений объектов, излучающих в УФ диапазоне, реализующая привязку изображения объекта к изображению окружающей местности. Приемник изображений выполнен в архитектуре электронно-оптического преобразователя (ЭОП); сформулированы модельные представления, которые позволили детально изучить процессы, протекающие в его базовых узлах. С использованием программного пакета COMSOL Multiphysics рассчитаны оптимальные величины управляющих потенциалов, обеспечивающих возможность регистрации и распознавания изображений объектов в привязке к изображению окружающей местности. Результаты исследований будут полезны при разработке в архитектуре ЭОП инновационного одноканального двухспектрального приемника изображений УФ объектов в привязке к изображению окружающей местности.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90125.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Беспалов, Э.А. Ильичев, И.П. Казаков, Г.А. Кирпиленко, А.И. Козлитин, П.В. Минаков, В.В. Сарайкин, А.В. Клековкин, С.В. Куклев, Г.Н. Петрухин, Г.С. Рычков, Д.С. Соколов, Е.Г. Теверовская. Письма в ЖТФ, **9**, 3 (2021). DOI: PJTF.2021.09.50897.18480
- [2] V.A. Bepalov, E.A. Il'ichev, I.P. Kazakov, G.A. Kirpilenko, A.I. Kozlitin, P.V. Minakov, V.V. Saraikin, A.V. Klekovkin, S.V. Kuklev, G.N. Petrukhin, G.S. Rychkov, D.S. Sokolov, E.G. Teverovskaya. *Diamond and Related Mater.*, **120**, 108603 (2021). DOI: 10.1016/j.diamond.2021.108603
- [3] К.Н. Мухин. *Экспериментальная ядерная физика* (Изд-во Лань, СПб., 2008), т. 1, с. 297.
- [4] Л. Фелдман, Д. Майер. *Основы анализа поверхности и тонких пленок* (Мир, М., 1989), с. 49.