

Исследование процессов считывания изображений тепловых объектов приемником, выполненным в архитектуре электронно-оптического преобразователя

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

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

Поступило в Редакцию 30 декабря 2021 г.
В окончательной редакции 26 февраля 2022 г.
Принято к публикации 26 февраля 2022 г.

Представлены результаты расчетов электрических полей, потенциалов и траекторий фотоэлектронов считывающего узла приемника изображений тепловых объектов с архитектурой электронно-оптического преобразователя. Определены величины оптимальных потенциалов на управляющих электродах (микроранальной пластины, считывающего электрода и фотокатода), формирующих картину изображений объектов и обеспечивающих корректное считывание потенциального рельефа с поверхности сенсорно-преобразовательной пироэлектрической пленки обсуждаемого приемника изображений.

Ключевые слова: электронно-оптический преобразователь, спонтанная поляризация, пироэлектрический сенсор, фотокатод, фотоэлектронная эмиссия, приемник изображений тепловых объектов, вторичная эмиссия электронов.

DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52368.338-21

Введение

Не вызывает сомнений актуальность разработки функционально эффективных и бюджетно-экономных неохлаждаемых приемников изображений тепловых объектов в привязке к изображению окружающей местности [1–3]. Схематическое изображение исследуемой конструкции инновационного одноканального приемника изображений тепловых объектов, выполненного в архитектуре электронно-оптического преобразователя (ЭОП), представлена на рис. 1.

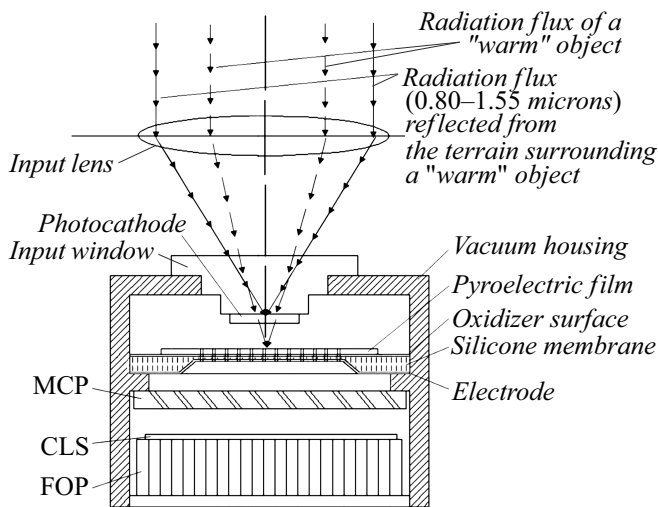


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции приемника изображений тепловых объектов, выполненного в архитектуре ЭОП.

Упомянутый приемник осуществляет функциональную интеграцию последовательности физических эффектов и процедур. В их числе:

- формирование изображений теплового объекта и окружающей местности, осуществляемое единой оптической системой в плоскостях расположения теплового сенсора и фотокатода, соответственно;
- преобразование оптического ($0.8-1.55 \mu\text{m}$) изображения местности в изображение в потоках фотоэлектронов посредством эффекта фотоэлектронной эмиссии;
- преобразование теплового изображения ($3-13 \mu\text{m}$) в картину распределения электрических потенциалов посредством пироэлектрического эффекта;
- считывание потоком фотоэлектронов, несущих информацию об окружающей тепловой объект местности, картины распределения электрических потенциалов на поверхности пироэлектрического сенсора, индуцированной изображением теплового поля объекта;
- умножение потока электронов, несущих информацию о тепловом объекте и окружающей его местности посредством использования эффекта вторичной эмиссии электронов;
- преобразование полной картины изображений в потоке электронов в изображение видимой части оптического диапазона с использованием эффекта катодoluminesценции.

Формирование суперпозиции изображений теплового объекта и окружающей местности осуществляется единой оптической системой. Излучение теплового объекта ($3-13 \mu\text{m}$) поглощается пироэлектрической сенсорно-преобразовательной пленкой, расположенной

в фокальной плоскости оптической системы теплового спектра; пропорционально освещенности индуцируются изменения величины ее поляризации, так что вблизи поверхности сенсора формируется картина распределения электрических потенциалов. Изображение окружающей тепловой объект местности ($0.8-1.55 \mu\text{m}$) формируется в отраженном излучении ночного неба, проецируется в плоскость фотокатода, поглощается его веществом и вызывает эмиссию фотоэлектронов. Разнесение в пространстве фокальных плоскостей изображений теплового объекта и окружающей местности обеспечивается разницей показателей преломления вещества линз входной оптики по отношению к спектральным диапазонам регистрируемых излучений. В частности, формирование потоков оптических излучений, несущих информацию о тепловом объекте ($3-13 \mu\text{m}$) и об окружающей местности ($0.8-1.55 \mu\text{m}$), осуществляемое оптической системой на основе CaF_2 , либо BaF_2 , позволяет разнести в пространстве их фокальные плоскости на практически удобные для реализации прибора расстояния $\sim 1 \text{ m}$. В качестве сенсора изображений местности (отраженные излучения спектрального диапазона $0.8-1.55 \mu\text{m}$) предлагается использовать германиевый фотокатод, степень прозрачности которого для тепловых излучений ($3-15 \mu\text{m}$) крайне высока (у высокоочищенного германия она достигает $\sim 40\%$, а у германия с поверхностью просветленной кремний-углеродной пленкой наноразмерной толщины — $\sim 85\%$). Изображение теплового объекта, проецируемое сквозь германиевый фотокатод на пироэлектрическую пленку теплового сенсора, индуцирует на его поверхности картину распределения электрических потенциалов, пропорциональных мощности теплового потока. Информация о тепловом объекте (потенциальный рельеф от теплового изображения) считывается потоком фотоэлектронов, дополнительно несущих информацию и об окружающей тепловой объект местности. Таким образом, потоки фотоэлектронов, после взаимодействия с потенциальным рельефом, индуцированным на поверхности теплового сенсора, становятся носителями информации как о тепловом объекте, так и об окружающей местности. Они считываются в направлении микроканальной пластины (МКП) сквозь соосно расположенные отверстия в пироэлектрической пленке и в несущей кремниевой мембране („считывающий“ электрод). Результирующий поток электронов усиливается МКП за счет эффекта вторичной эмиссии электронов, затем ускоряется в вакуумном промежутке выходной электрод МКП—католюминесцентный экран (КЛЭ) и проецируется на КЛЭ. На КЛЭ изображения в потоках электронов пропорционально преобразуются в изображения видимой части оптического диапазона, несущие информацию о тепловом объекте на фоне окружающей местности. Результирующее изображение в видимой части оптического диапазона выводится из корпуса прибора посредством волоконно-оптической пластины (ВОП) и может считываться как визуально, так

и посредством ПЗС-приемника, входное окно которого связывают с ВОП иммерсионной средой.

Эффективность обсуждаемого инновационного приемника изображений тепловых объектов в привязке к изображению окружающей местности будет определяться качеством интеграции в приборе перечисленных физических эффектов и процедур. Обсуждаемая конструкция приемника тепловых изображений осуществляет не только привязку изображения теплового объекта к изображению окружающей местности, но и обеспечивает внутреннее усиление электронного потока, что позволяет рассчитывать на приемлемую пороговую чувствительность прибора. Величина коэффициента усиления определяется веществом и конструктивными особенностями МКП.

1. Модельные представления и результаты расчетов

Анализ характера и степени влияния особенностей конструкции и режимов питания на эффективность прибора необходим для согласования характерных величин потенциалов, индуцированных изображением теплового теплового объекта на пироэлектрической пленке, энергий фотоэлектронов считывающего пучка, а также изменений картины распределения потенциалов вблизи поверхности теплового сенсора, вносимых потенциалами кремниевой мембраны и входного электрода МКП. В процессе анализа и расчетов нами использовались известные функциональные зависимости и физические представления, развитые о вышеупомянутых физических эффектах.

Для расчета динамики нагрева сенсорно-преобразовательной пленки было использовано уравнение теплового баланса

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = \gamma P, \quad (1)$$

где \mathbf{q} — потери потока тепловой мощности за счет теплопроводности структуры

$$\mathbf{q} = -G \nabla T. \quad (2)$$

G — коэффициент теплопроводности многослойной структур, ρ — плотность, C_p — теплопроводность, \mathbf{q}_r — потери потока тепловой мощности, связанные с излучением.

Потери потока тепловой мощности за счет излучения (\mathbf{q}_r) оценивались в приближении Стефана–Больцмана

$$\mathbf{q}_r \cdot \mathbf{n} = \gamma \sigma (T^4 - T_{initial}^4), \quad (3)$$

где \mathbf{n} — единичный вектор нормали к поверхности исследуемой структуры, $T_{initial}$ — начальная температура, T — текущая температура сенсорно-преобразовательного слоя; σ — постоянная Стефана–Больцмана и γ — коэффициент черноты поверхности сенсорной пленки.

При выполнении расчетов индуцированной тепловым полем поляризации сенсорно-преобразовательной пленки использовались уравнение (4) и уравнение теплового баланса (1):

$$\Delta P_S = p\Delta T = p(T_{initial} - T(t)), \quad (4)$$

где $T_{initial}$ — начальная температура, p — пирозлектрический коэффициент, ΔP_S — изменение вектора поляризации.

С использованием уравнения (5), полученного нами в [5], была рассчитана координатная зависимость величины электрического потенциала от величины индуцированной поляризации пленки, и зависимость потенциала от расстояния z до поверхности пленки в любой промежуток времени:

$$\Delta\phi(z) = \frac{\Delta P_S}{2\epsilon_0} \left(\sqrt{(z+d)^2 + R^2} - \sqrt{z^2 + R^2} - d \right). \quad (5)$$

При расчетах напряженности электрических полей, влияющих на поток фотоэлектронов, использовано уравнение (6), описывающее связь электрических полей и потенциалов.

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi, \quad (6)$$

где действующее электрическое поле получали как суперпозицию электрических полей от потенциалов на фотокатоде, пирозлектрической пленке, кремниевой мембране, и входном электроде МКП и суперпозиции электрических полей потока фотоэлектронов между собой, связанной с кулоновским взаимодействием (7):

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{PhC} + \mathbf{E}_{PF} + \mathbf{E}_{Si} + \mathbf{E}_{Coulomb}. \quad (7)$$

Здесь \mathbf{E}_{PhC} — напряженность электрического поля от потенциала фотокатода, \mathbf{E}_{PF} — напряженность электрического поля от потенциалов пирозлектрической пленки, \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, которое описывается выражением (8).

$$\mathbf{E}_{Кул} = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^n \mathbf{E}_{ij} = \frac{1}{2} \frac{1}{q} \sum_{i,j}^n k \frac{q_i q_j}{r_{ij}^3} \mathbf{r}_{ij}, \quad (8)$$

где \mathbf{E}_{ij} — напряженность электрического поля между i -ым и j -ым электроном, q_i и q_j — заряд i -ого электрона, k — кулоновский коэффициент, r_{ij} — радиус-вектор между i -ым и j -ым электроном, q — элементарный заряд электрона, суммирование происходит по каждому i -ому и j -ому 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 проницаемостью ϵ_1 и ϵ_2 использовалось уравнение (9):

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}, \quad (9)$$

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 траекторию потока фотоэлектронов используется уравнение (10):

$$q\mathbf{E} = m_e \frac{dv}{dt}, \quad (10)$$

где q — элементарный заряд, m_e — масса электрона и v — скорость электрона.

При расчетах коэффициента умножения потока электронов в МКП использовано выражение (11), представляющее оценку числа рожденных вторичных электронов при взаимодействии электронов с веществом МКП:

$$n_{secondary} = \frac{E_{primary}}{E_{pair\ form}}, \quad (11)$$

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

При анализе процессов потери энергии электронами при обратном преобразовании сформированного изображения в потоках электронов в изображение видимой части оптического диапазона используется уравнение Бете (расчет потерь энергии по ионизационному механизму) [4].

Интегрирование последовательности перечисленных физических эффектов и процедур позволило сформировать модельные представления и изучить процессы преобразований и считываний изображений, как в базовых узлах, так и в целом в одноканальном двухспектральном приемнике тепловых изображений ЭОП архитектуры. Что касается результатов аналитических и численных расчетов картин распределения электрических полей и потенциалов, индуцированных на поверхности пирозлектрической пленки тепловыми потоками, то они ранее нами были выполнены нами и представлены в периодической печати [5].

В настоящей работе акцент сделан на теоретическом анализе и численных расчетах управляющих потенциалов, необходимых для реализации процесса корректного считывания информации о распределении электрических потенциалов на поверхности пирозлектрической пленки. Расчеты выполнены в программном пакете COMSOL Multiphysics (рис. 2). Объектом исследований и анализа являлся приемник изображений в составе следующих базовых узлов: фотокатода (на основе германия, $0.8-1.55 \mu\text{m}$); пирозлектрической пленки ($3-13 \mu\text{m}$), расположенной на окисленной поверхности кремниевой мембраны (возможен вариант — $\text{SiO}_2/\text{Me}/\text{MCP}$); микроканальной пластины (МКП); катодолуминесцентного экрана (КЛЭ).

Предварительные оценки и результаты экспериментальных исследований позволили, в качестве исходных

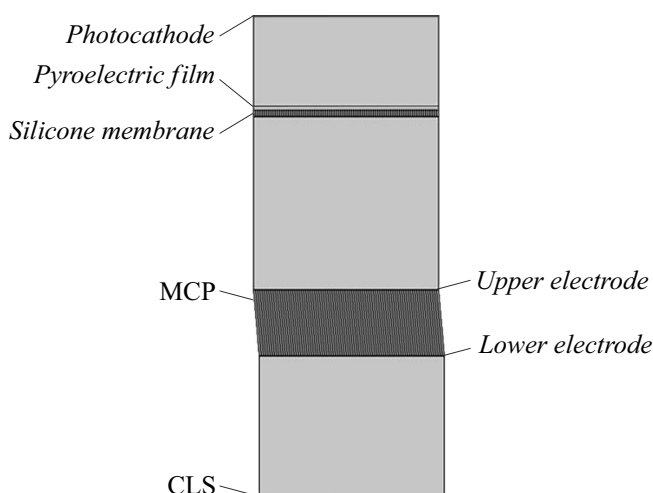


Рис. 2. Схематическое изображение оптического тракта приемника тепловых изображений, исследованного численно в программном пакете COMSOL Multiphysics.

значений для характерных величин потенциала пироэлектрической пленки и начальной энергии доминирующих фотоэлектронов считывающего потока, выбрать величины -1 В и 0.5 эВ, соответственно.

1.1. Оптимизация потенциала на кремниевой мембране

Использование кремниевой мембраны в качестве считывающего электрода обеспечивает большую гибкость при формировании и управлении траекториями движения электронов считывающего электронного потока. Возможность варьировать величину потенциала на кремниевой мембране позволяет оптимизировать процесс управляемого считывания с пироэлектрического сенсора информацией потоком фотоэлектронов. Рассчитаны оптимальные параметры, позволяющие снизить вероятности искажения информации из-за возможного захвата фотоэлектронов пироэлектрической пленкой. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Анализировались характеристики временной зависимости числа захваченных фотоэлектронов от потенциала на Si мембране, при этом на фотокатод был подан потенциал, равный -1 В, а на верхний электрод МКП — потенциал величиной 30 В. В качестве считывающего потока электронов при моделировании использовался массив в сотню (100) фотоэлектронов, эмитированных фотокатодом, и несущих информацию об интенсивности отраженного от окружающей местности излучения ($0.8-1.55$ мкм).

С использованием результатов анализа динамики процесса захвата фотоэлектронов (рис. 3) для начала стационарного режима (выход на „плато“) построен график зависимости числа захваченных электронов от величины потенциала на кремниевой мембране (рис. 4).

Рис. 4 иллюстрирует монотонный характер уменьшения максимального числа захваченных пироэлектрическим сенсором фотоэлектронов считывающего потока при увеличении величины потенциала на считывающем электроде (на кремниевой мембране).

Для выявления возможных паразитных эффектов изменений потенциала кремниевой мембраны при считывании картин изображений выполнены расчеты траекторий фотоэлектронов в пространстве между кремниевой мембраной и входным электродом МКП. Результаты представлены на рис. 5 и 6 при потенциалах на кремниевой мембране 5 В и 25 В, соответственно. При этом, потенциал входного электрода МКП был зафиксирован на уровне в 30 В.

Анализ поведения траекторий фотоэлектронов считывающего потока при различных потенциалах на крем-

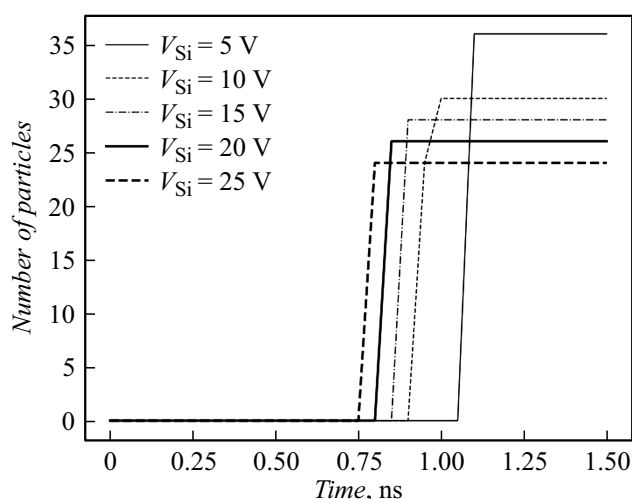


Рис. 3. Временная зависимость числа захваченных пироэлектрической пленкой фотоэлектронов от потенциала на кремниевой мембране.

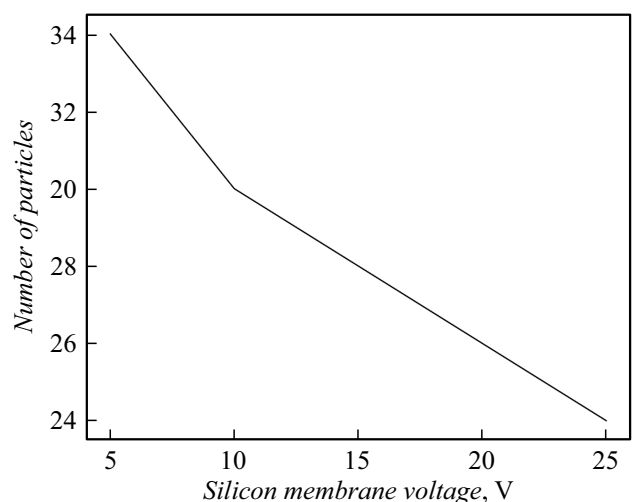


Рис. 4. Зависимость числа захваченных пироэлектрической пленкой фотоэлектронов в стационарной области от потенциала на кремниевой мембране.

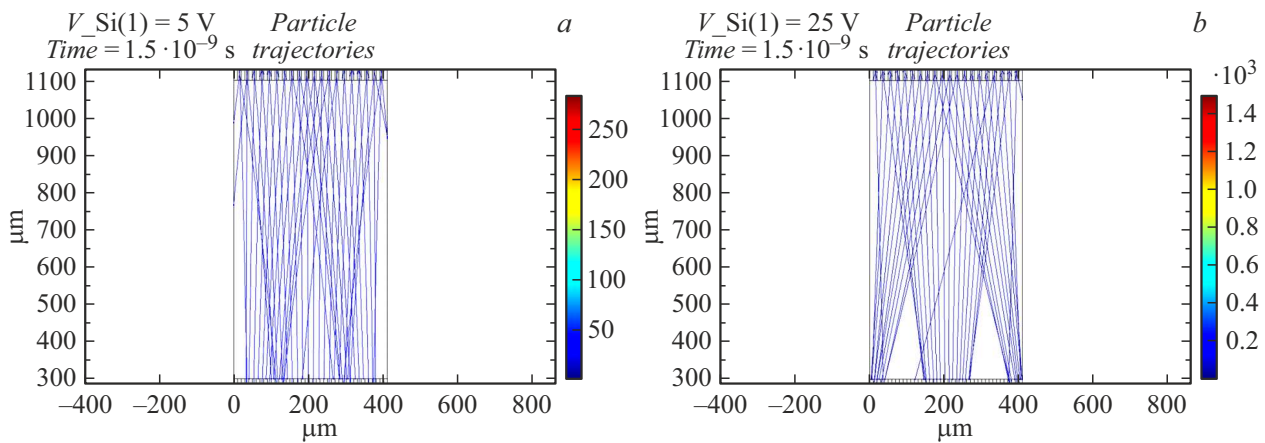


Рис. 5. Траектория электронов между кремниевой мембраной и МКП при потенциалах 5 (a) и 25 В (b) на мембране.

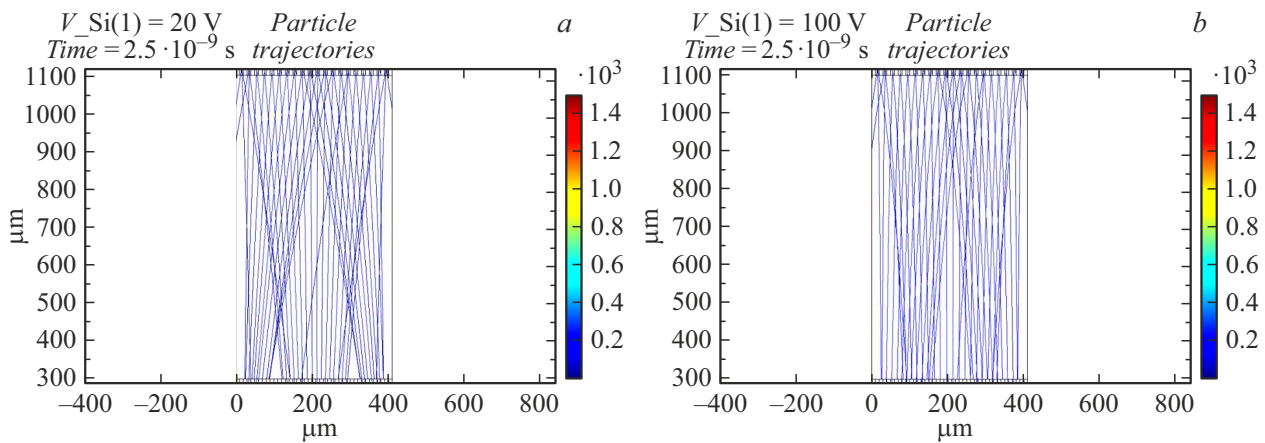


Рис. 6. Траектория электронов в пространстве между кремниевой мембраной и МКП при потенциалах 20 (a) и 100 В (b) на верхнем электроде МКП.

ниевой мембране показал, что чрезмерное увеличение потенциала на кремниевой мембране приводит к расфокусировке электронной картины теплового изображения (рис. 5, b). Поэтому, при поиске оптимальной величины потенциала на кремниевой мембране необходимо соблюсти баланс между числом захваченных пироэлектрической пленкой электронов и степенью расфокусировки электронов потока. По результатам расчетов, оптимальная величина управляющего потенциала на кремниевой мембране лежит в диапазоне в 10–15 В, а проблему упомянутых искажений (связанных с расфокусировкой электронной картины изображения) можно дополнительно корректировать посредством увеличения потенциала на входном электроде МКП.

1.2. Оптимизация потенциалов на электродах МКП

При подборе потенциалов на электродах МКП также необходимо учитывать возможность проявления различных (в том числе паразитных) факторов влияния.

Очевидно, что разность потенциалов между входными и выходными электродами определяет коэффициент умножения потока электронов (т.е. определяет внутреннее усиление прибора), ограничиваемое пределом электрической прочности вещества МКП, что показано на рис. 7. Число умноженных электронов экспоненциально растет с ростом разности потенциалов между входным и выходным электродами МКП.

Очевидной является и необходимость значимого превышения потенциала на входном электроде МКП величины отношения $E_{pair\ form}/q$, где $E_{pair\ form}$ — энергия образования вторичных электронов, q — элементарный заряд. Из зависимости числа умноженных электронов от потенциала на верхнем электроде МКП при фиксированной разности потенциалов в 500 В наблюдаем при 80–100 В на верхнем электроде МКП эффект „насыщения“ числа умноженных электронов (рис. 8). Таким образом, оптимальным потенциалом на входном электроде МКП будет величина в 80–100 В.

Менее очевидным является влияние величины потенциала входного электрода МКП на степень „рас-

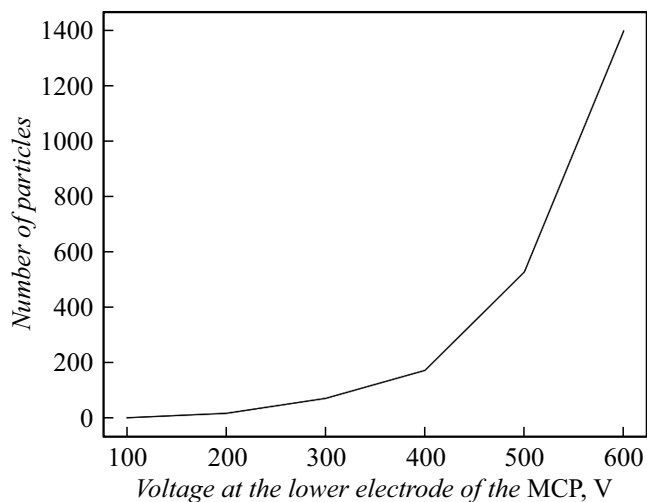


Рис. 7. Зависимость числа умноженного потока электронов от потенциала на выходном электроде МКП при фиксированном потенциале на входном электроде.

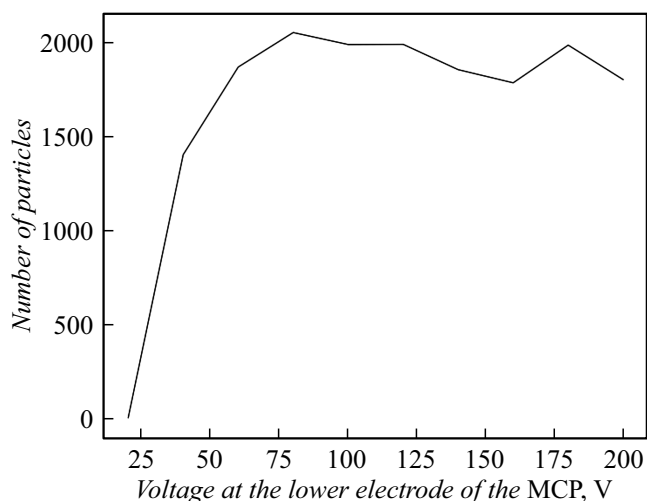


Рис. 8. Зависимость коэффициента умноженного потока электронов в МКП от величины потенциала на входном электроде МКП (при фиксированной разности потенциалов МКП в 500 В).

фокусировки“ электронной картины изображения. Для оценки влияния потенциала верхнего электрода МКП на процесс формирования картины изображений были рассчитаны и построены траектории электронов между кремниевой мембраной и МКП (рис. 6) при различных потенциалах на электродах МКП. При этом потенциал на кремниевой мембране был зафиксирован на уровне 10 В, а потенциал на фотокатоде был выбран равным –1 В, разность потенциалов между электродами МКП ~ 500 В. Потенциал на нижнем (дальнем от входного окна) электроде МКП был выбран равным ~ 600 В.

Из представленных на рис. 6 результатов расчета зависимости траекторий фотоэлектронов считывающего потока от потенциала на входном электроде МКП сле-

дует, что с ростом его величины, вплоть до 100 В, происходит минимизация степени расфокусировки теплового изображения. При этом потенциал выходного электрода МКП практически не оказывает влияния на траекторию фотоэлектронов считывающего пучка (рис. 9). Однако он играет важную роль в умножении потока электронов.

Для получения максимальной величины умножения МКП, кроме подбора потенциалов, важно выбрать оптимальный угол отклонения оси каналов МКП относительно оптической оси изделия. С изменением упомянутого угла отклонения будет меняться и число циклов умножения, и энергия „первичных“ электронов для каждого цикла умножений. Расчеты выполнены в программном пакете COMSOL Multiphysics, а результаты представлены на рис. 10.

Из рис. 10 следует, что оптимальным углом разориентации направления осей каналов МКП относительно нормали к плоскости пластины, при энергии образования пары в 10 эВ, будет величина в ~ 3 градуса. Расчеты выполнены для толщины МКП, равной 150 мкм, и для коэффициента умножения МКП получено значение ~ 2000:

$$G = \frac{n_{\text{output}}}{n_{\text{input}}}, \quad (12)$$

где n_{input} — число электронов на входе в МКП, n_{output} — число электронов, выходящих из МКП.

Таким образом, коэффициент умножения МКП представим выражением (13):

$$G = n_{\text{secondary}}^{m_{\text{collision}}} \quad (13)$$

(где $m_{\text{collision}}$ — число циклов вторичных взаимодействий электронов с поверхностью каналов МКП), а значит двукратное увеличение толщины МКП приводит к квадратичному изменению коэффициента умножения потока электронов.

Итак, оптимальной величиной потенциала на входном электроде МКП можно считать потенциал величиной ~ 100 В (рис. 8), так как он обеспечит в первом цикле взаимодействий первичных электронов с веществом МКП максимальный коэффициент умножения и одновременно минимизирует размытие (расфокусировку) пучка электронов. Результаты расчетов коэффициента умножения потока электронов показали, что для реализации коэффициента умножения потока электронов в ~ 2000 раз при энергии образования пары ~ 10 эВ величина потенциала на выходном электроде МКП толщиной 150 мкм должна составлять ~ 500–600 В. Оптимальный угол ориентации (отклонения оси каналов МКП относительно оптической оси изделия) при указанных выше параметрах составит величину ~ 3 градуса.

1.3. Оптимизация потенциалов на фотокатодe

При оптимизации величины управляющего потенциала на фотокатодe необходимо обеспечить близкие величины энергий фотоэлектронов и энергий, соответствующи-

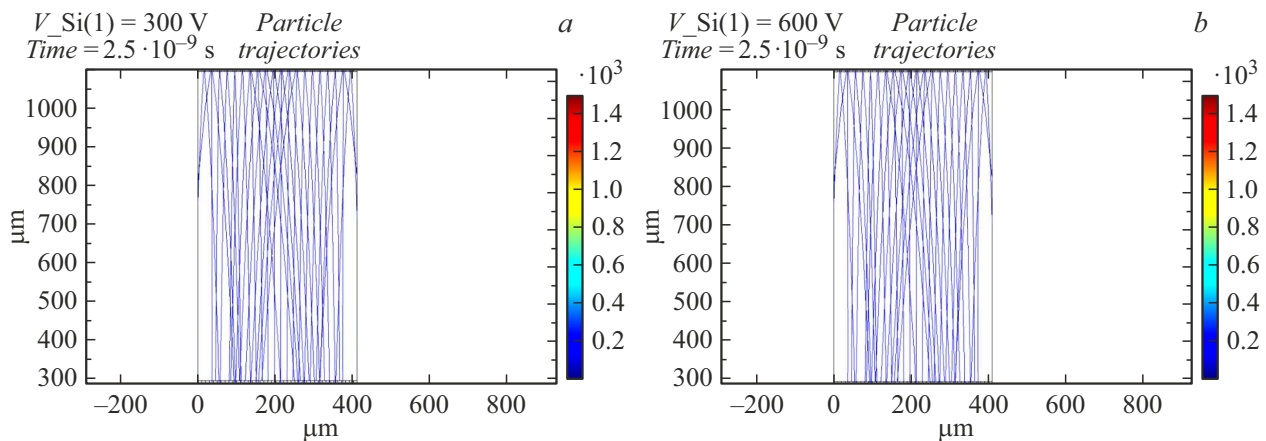


Рис. 9. Траектория электронов между кремниевой мембраной и входном электроде МКП при потенциалах на входном электроде МКП в 300 V (a) и в 600 V (b).

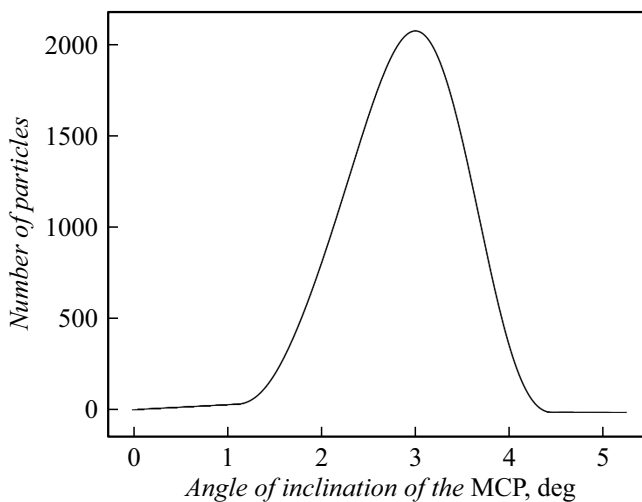


Рис. 10. Зависимость коэффициента умножения потока электронов от угла ориентации каналов МКП относительно оптической оси изделия.

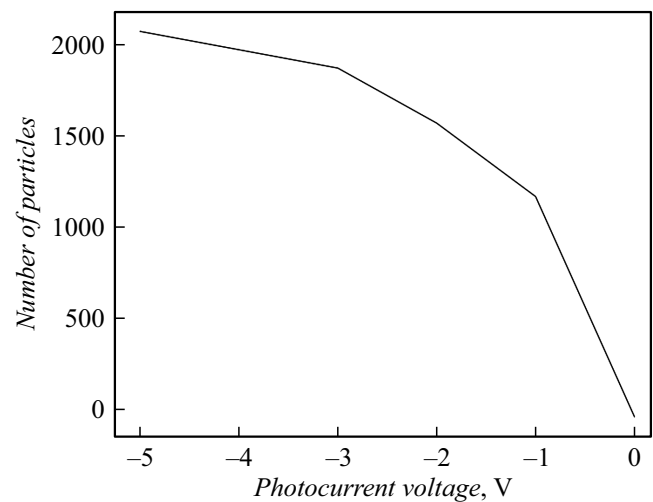


Рис. 11. Влияние электрического потенциала фотокатода на число захваченных фотоэлектронов пироэлектрической пленкой.

ших пироэлектрическим потенциалам вблизи поверхности сенсорно-преобразовательной пленки. При потенциале на входном электроде МКП ~ 100 V и потенциале на кремниевой мембране ~ 10 V была рассчитана и ниже в виде графика представлена зависимость числа захваченных пироэлектрической пленкой фотоэлектронов от потенциала на фотокатоде (рис. 11).

Представленная выше функциональная зависимость позволяет выбрать оптимальную величину управляющего потенциала на фотокатоде; находится она в диапазоне $(-1.0) - (-0.5)$ V.

Таким образом, в результате расчетов и анализа выбраны оптимальные величины потенциалов, энергии фотоэлектронов считывающего пучка и оптимальный угол рассогласования наклона оси ориентации каналов МКП относительно оптической оси приемника изображений, которые и представлены в таблице.

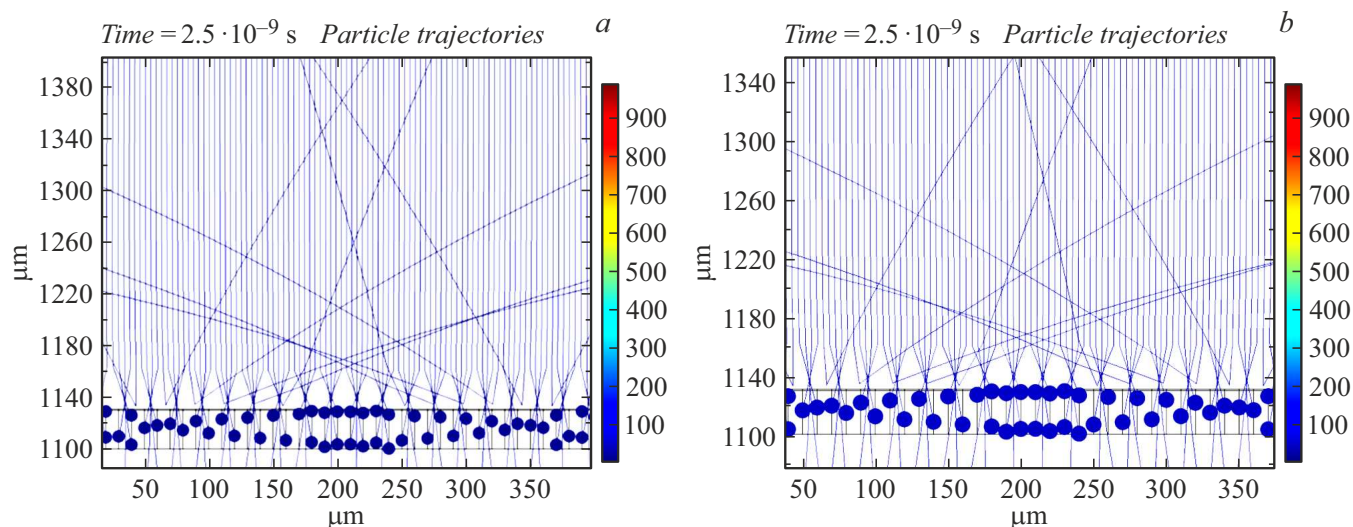
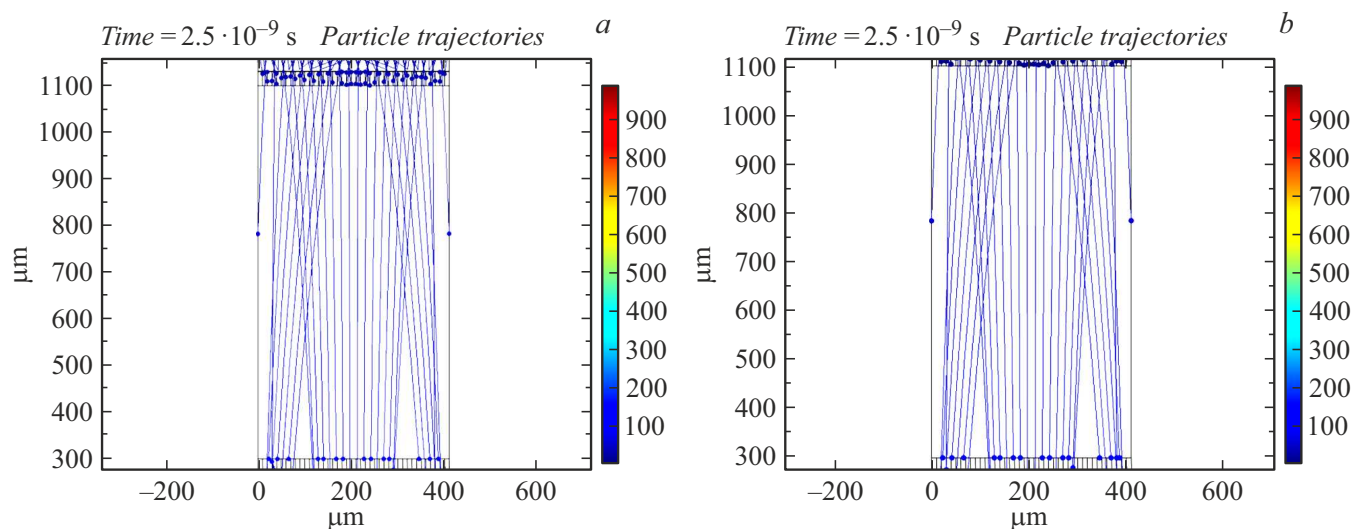
2. Учет влияния спонтанной поляризации пироэлектрической пленки на чувствительность приемника изображений

2.1. Случай наличия потенциала от спонтанной поляризации сенсорно-преобразовательной пленки

Изучено влияние спонтанной поляризации пироэлектрической пленки теплового сенсора на чувствительность прибора. Модельно это осуществлялось посредством расчетов и анализа поведения траекторий электронов считывающего пучка при неоднородном характере распределения теплового поля в плоскости пироэлектрической пленки в присутствии потенциала спонтанной поляризации.

Таблица 1. Базовые параметры управляющих потенциалов и угла ориентации каналов МКП приемника изображений тепловых объектов

Угол ориентации каналов МКП, deg	Потенциал кремниевой мембраны, V	Потенциал фотокатода, V	Потенциал на верхнем электроде МКП, V	Потенциал на нижнем электроде МКП, V	Потенциал на электроде люминофора, V	Начальная энергия фотоэлектронов, eV
3	10	-1-0	100	600-1100	3000	0.5-1

**Рис. 12.** Траектории фотоэлектронов между фотокатодом и кремниевой мембраной при локальном нагреве поверхности пироэлектрической пленки в центральной области (a) и правом секторе (b) пленки при наличии потенциала спонтанной поляризации.**Рис. 13.** Траектории фотоэлектронов между кремниевой мембраной и МКП при локальном нагреве поверхности пироэлектрической пленки в центральной области (a) и правом секторе (b) пленки при наличии потенциала спонтанной поляризации.

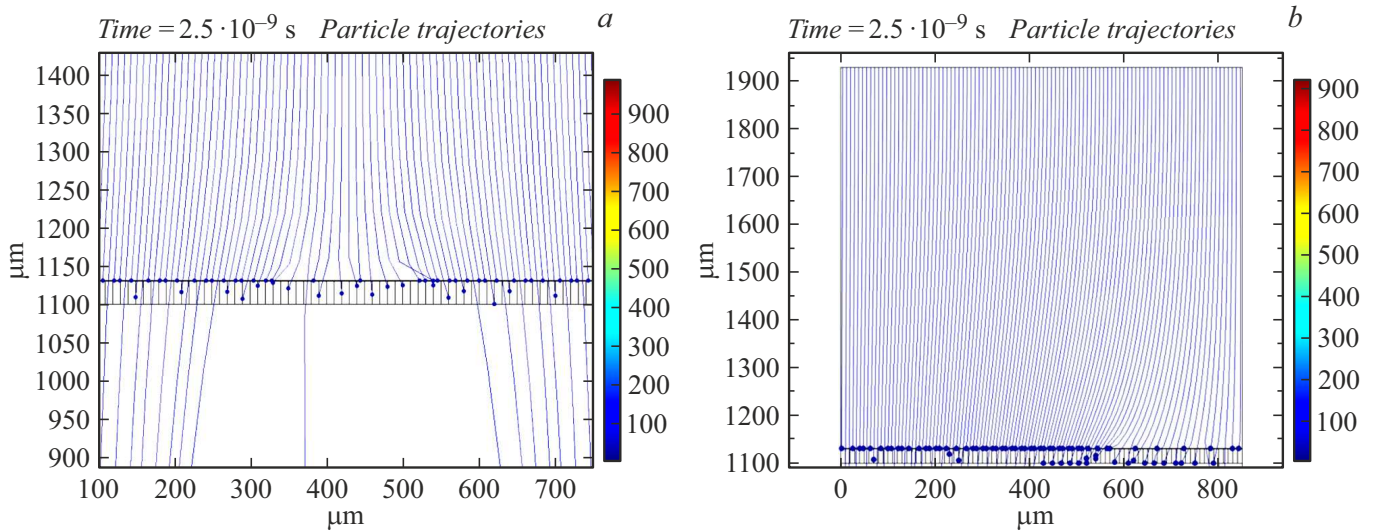


Рис. 14. Траектории фотоэлектронов считывающего потока между фотокатодом и кремниевой мембраной при локальном нагреве поверхности пироэлектрической пленки в центральной области (а) и правом секторе (b) пленки в отсутствие потенциала спонтанной поляризации.

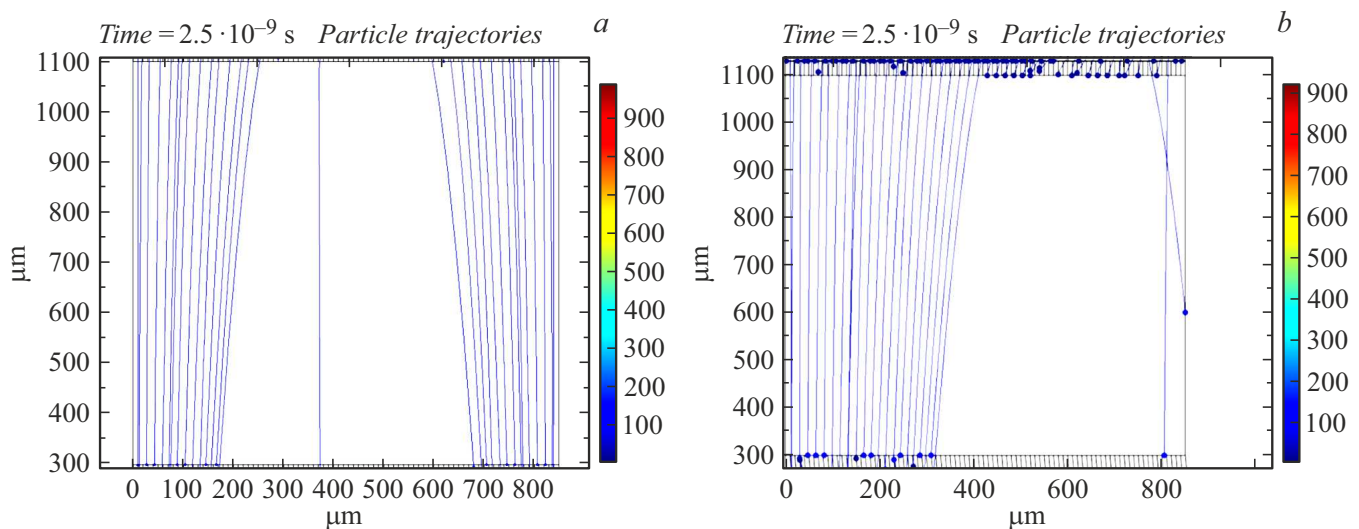


Рис. 15. Траектории фотоэлектронов между кремниевой мембраной и МКП при локальном нагреве поверхности пироэлектрической пленки в центральной области (а) и правом секторе (b) пленки в отсутствие потенциала спонтанной поляризации.

В частности, рассматривался случай нагрева серединного и краевого (правого) секторов поверхности пленки. Предварительный анализ [5] позволил определить диапазон характерных величин потенциалов, индуцированных тепловым полем. Он составил $\sim 1\text{--}2\ \mu\text{V}$ при расстоянии до теплового объекта $\sim 100\ \text{m}$ (мощность тепловых излучений $\sim 0.2\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$) и $10\text{--}15\ \mu\text{V}$ при расстоянии до теплового объекта $\sim 30\ \text{m}$. Ниже при расчетах нами использована величина изменений поверхностного потенциала $\sim 1\ \mu\text{V}$. При этом величина поверхностного потенциала из-за спонтанной поляризации (т.е. в „холодной“ области пленки) составляла $-1\ \text{V}$.

Для оценки возможности считывания информации об изменениях поверхностного потенциала, индуцированного тепловым полем при наличии потенциала спонтанной поляризации, были построены траектории фотоэлектронов между фотокатодом и кремниевой мембраной (рис. 12), а также между кремниевой мембраной и МКП (рис. 13).

Практически не наблюдается значимого влияния индуцированного потенциала на траектории электронов считывающего потока. Таким образом, из результатов расчетов и анализа поведения траекторий фотоэлектронов считывающего потока, представленных на рис. 12 и 13, следует необходимость обязательного „сброса“

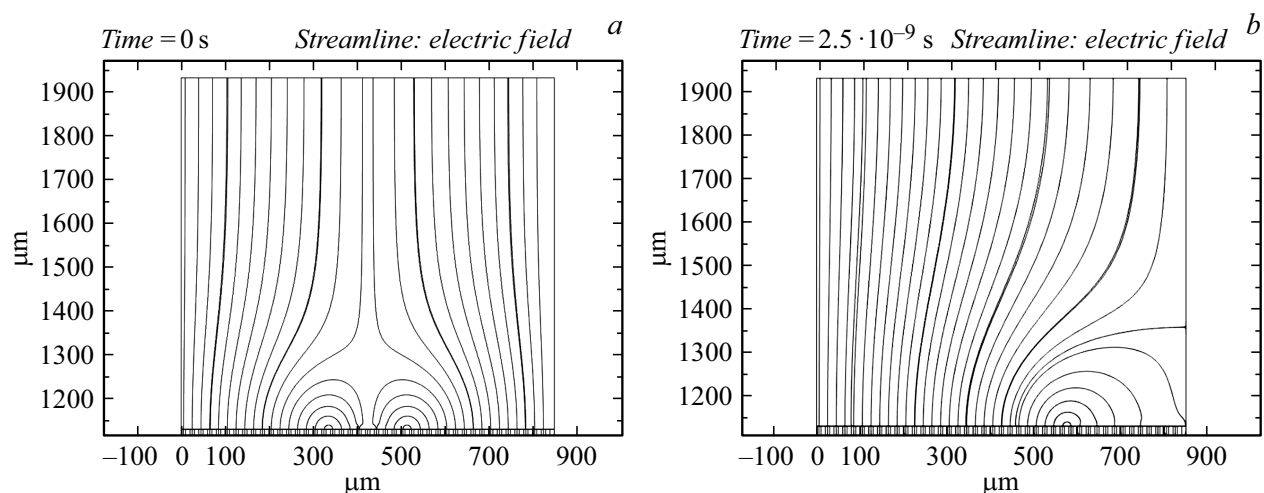


Рис. 16. Картина распределения электрического поля вблизи поверхности кремниевой мембраны при локальном нагреве поверхности пироэлектрической пленки в центральной области (а) и правом секторе (b) пленки в отсутствие потенциала спонтанной поляризации.

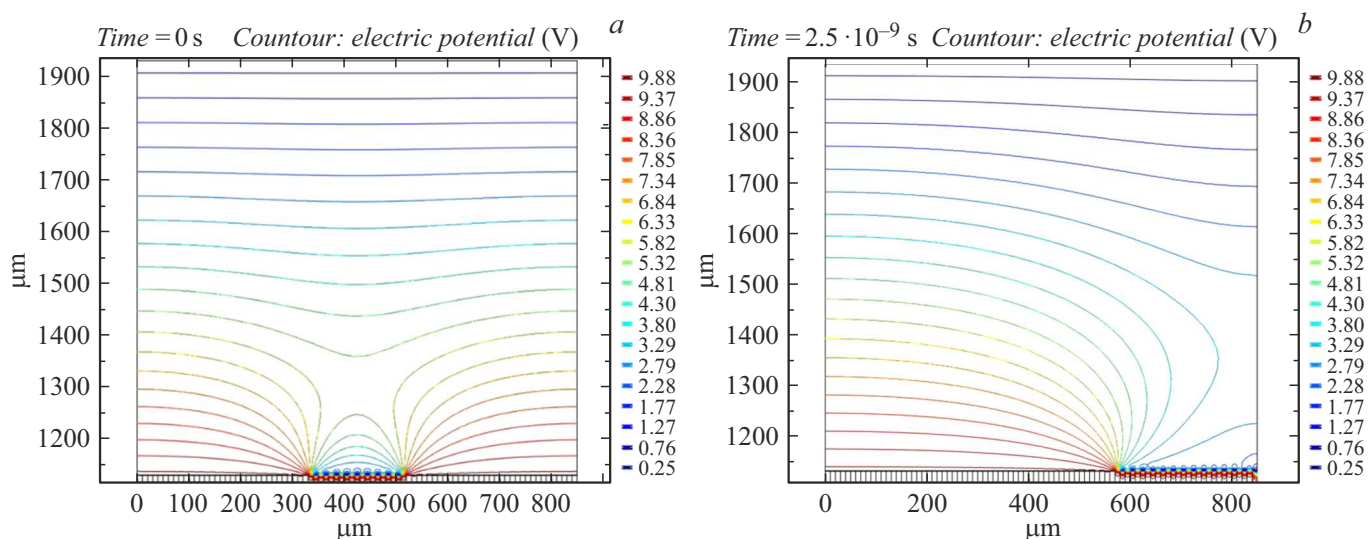


Рис. 17. Картина распределения потенциала вблизи поверхности кремниевой мембраны при локальном нагреве поверхности пироэлектрической пленки в центральной области (а) и правом секторе (b) пленки в отсутствие потенциала спонтанной поляризации.

или компенсации начального потенциала, связанного со спонтанной поляризацией.

2.2. Случай считывания поверхностного потенциала при предварительном „сбросе“ или компенсации потенциала, связанного со спонтанной поляризацией вещества пленки

В случае „сброса“ либо компенсации спонтанного потенциала реализуется возможность считывания информационного сигнала, что демонстрируется значимым влиянием индуцированных тепловым полем изменений потенциалов на траектории считывающих электронов

при прохождении ими участков неоднородно нагретых областей пленки (рис. 14 и 15).

Характер поведения траекторий считывающих электронов соответствует пространственному распределению электрических полей и потенциалов между фотокатодом и кремниевой мембраной (рис. 16 и 17).

Таким образом, в случае организации „сброса“ начального потенциала пироэлектрической пленки, связанного с ее спонтанной поляризацией, обсуждаемый в настоящей работе одноканальный эмиссионный приемник архитектуры ЭОП может быть использован для регистрации изображений тепловых объектов в привязке к изображению окружающей местности.

Заключение

Сформулирована физико-математическая модель, позволяющая изучить процессы, протекающие в базовых узлах одноканального эмиссионного приемника изображений тепловых объектов, выполненного в архитектуре ЭОП. С использованием программного пакета COMSOL Multiphysics определены оптимальные величины управляющих потенциалов и конструкций базовых узлов приемника изображений, обеспечивающие возможность регистрации и распознавания изображений тепловых объектов в привязке к окружающей местности. Показана необходимость обязательного „сброса“ (либо компенсации) потенциала, связанного со спонтанной поляризацией. Результаты исследований будут полезны при разработке инновационного неохлаждаемого приемника изображений тепловых объектов, реализованного в архитектуре ЭОП.

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] U. Adomeit. SENSOR+TEST Conf. 2009 (Nürnberg, AMA Service GmbH, 2009), p. 221–226.
DOI: 10.5162/irs09/i2.3
- [2] O. Cocle, C. Rannou, B. Forestier, P. Jouglu, P.F. Bois, E.M. Costard, A. Manissadjian, D. Gohier. *Infrared Technology and Applications XXXIII*, ed. by B.F. Andresen, G.F. Fulop, P.R. Norton (Proc. Orlando, SPIE, 2007), p. 654234, v. 6542.
DOI: 10.1117/12.723720
- [3] H. Vogel, H. Schlemmer. *Detectors and Associated Signal Processing II*. Ed. by J.-P. Chatard, P.N.J. Dennis (Proc. SPIE, Jena, 2005), p. 59640S, v. 5964.
DOI: 10.1117/12.625180
- [4] Л. Фелдман, Д. Майер. *Основы анализа поверхности и тонких пленок* (Мир, М., 1989), с. 49.
- [5] А.С. Гревцев., П.А. Золотухин, Э.А. Ильичев, Г.Н. Петрухин, А.В. Попов, Г.С. Рычков. *ЖТФ*, **92** (4), 507 (2022).
DOI: 10.21883/JTF.2022.04.52237.270-21