

¹ Центр по изучению тяжёлых ионов им. Гельмгольца, Дармштадт, Германия

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Инфракрасное излучение: открытие и применение

Инфракрасное излучение было обнаружено в 1800 году известным британским астрономом немецкого происхождения Уильямом Гершелем (*William Herschel*, 1738 - 1822) (рис. 1). Гершель хотел сравнить интенсивность различных длин волн в солнечном спектре, используя призму с зачерненными ртутными термометрами (рис. 2). К его удивлению, температура за красным светом была выше, чем в видимой области. Так Гершель открыл инфракрасное излучение с длиной волны больше, чем у красного ($\lambda > \lambda_{кр}$), которое он назвал «калорийным излучением». Сами названия «инфракрасного» (ИК) и «ультрафиолетового» (УФ) излучения, открытого немецким физиком-химиком Иоганном Риттером (*Johann Wilhelm Ritter*, 1776–1810) в 1801 году, были введены только в начале двадцатого века.



Рисунок 1 – Уильям Гершель (1738–1822) был одним из основоположников современной астрономии и первооткрывателем инфракрасного излучения. О Млечном пути он сказал: «Весьма вероятно, что великое скопление звёзд, называемый Млечным путем, — это тот слой, в котором находится и Солнце, хотя быть может и не в самом центре»

Уильям Гершель был одним из основоположников современной астрономии. Он открыл двойные звезды и множество звездных туманностей Млечного Пути, а также седьмую планету Солнечной системы – Уран. В 1774 году Гершель построил новый телескоп, который облегчил дальнейшие наблюдения Млечного Пути. Его открытие инфракрасного излучения открыло новую эру для астрономии и многих технических приложений. Помимо астрономии, он был

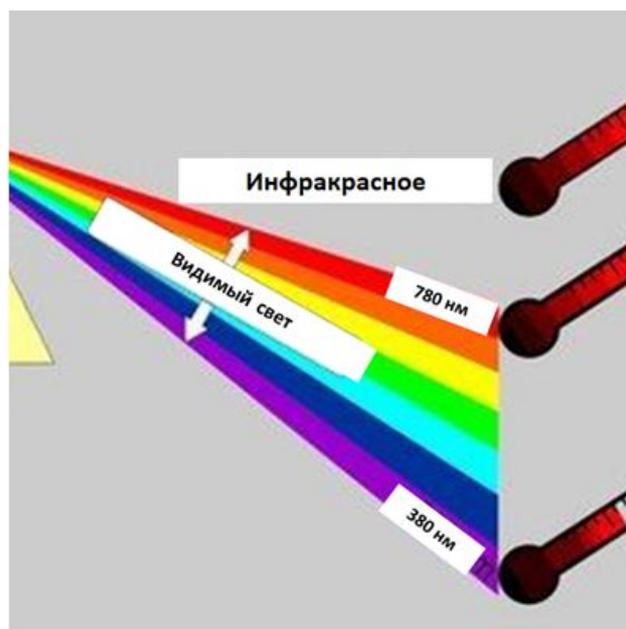


Рисунок 2 – Уильям Гершель опубликовал свое открытие инфракрасного излучения в 1800 году: он использовал зачерненные ртутные термометры для исследования теплового эффекта в видимом солнечном спектре (от фиолетового до красного) и наблюдал более сильный тепловой эффект области более длинных волн ($\lambda > \lambda_{кр}$). Он назвал это излучение «калорийным», название «инфракрасное» появилось позднее

успешным композитором, сочинившим 18 симфоний для небольших оркестров и 6 симфоний для больших оркестров, а также многие другие музыкальные произведения.

1. Инфракрасное излучение и инфракрасные детекторы

Инфракрасное излучение охватывает электромагнитный спектр в диапазоне длин волн за красным светом от 800 нм до радиоволн с $\lambda = 1 \text{ мм} = 1000 \text{ мкм}$. Открытие инфракрасного излучения ускорило исследования теплового излучения и способствовало открытию закона излучения Планка с введением концепции квантов, что стало началом квантовой физики.

Первыми электрическими детекторами теплового излучения были термопары. Термоэлектрический эффект был открыт в 1821 году немецким физиком Томасом Зеебеком (*Thomas Johann Seebeck*, 1770 – 1831, рис. 3а). В 1826 году Антуан Сезар Беккерель (*Antoine Cesar Becquerel*, 1788 - 1878), дед первооткрывателя радиоактивности Анри Беккереля (*Henri Becquerel*, 1852 - 1908), в результате своих исследований термоэлектричества, рекомендовал использовать термопару из платины и палладия, и вел платину в качестве термоэлектрического материала в измерительную технику. Платина до сих пор остается наиболее распространенным материалом для изготовления термопар из драгоценных металлов.

Первая термобатарея была построена из сурьмы (Sb) и висмута (Bi) в 1823 году Хансом Эрстедом (*Hans Christian Orsted*, 1777-1851) и Джозефом Фурье (*Joseph Fourier*, 1768-1830) независимо (рис. 3б). Последовательное соединение термопар увеличило чувствительность термобатареи, и вскоре стало возможным обнаруживать инфракрасное излучение человека на расстоянии до 10 м. Первые технические применения термобатареи относятся к 1864 году, они использовались на кораблях для раннего обнаружения айсбергов. В 1918 году, во время Первой мировой войны, британская армия использовала термобатарею, которая находилась в фокусе параболического зеркала, для обнаружения отдельных солдат противника в ночное время.

Использование инфракрасного излучения резко возросло во второй половине двадцатого века после разработки полупроводниковых детекторов [1].

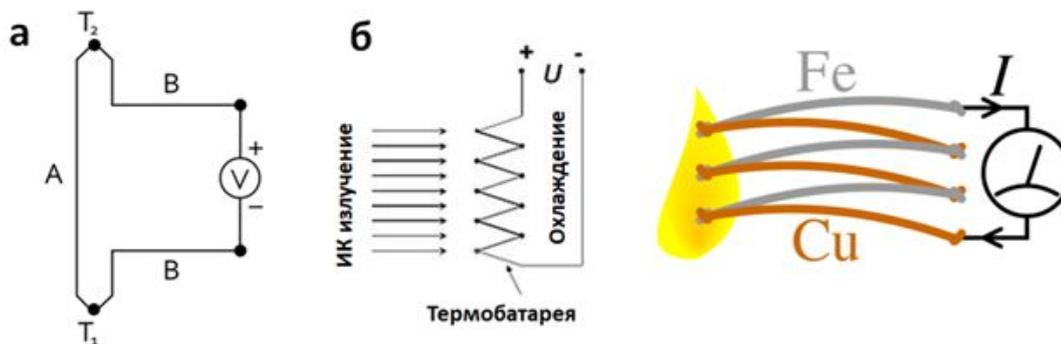


Рисунок 3 – Первые инфракрасные детекторы: а - термопара, открытая в 1821 году немецким физиком Томасом Зеебеком (1770 - 1831); б - Термобатарея из нескольких термопар, создана в 1823 году датским физиком Гансом Эрстедом (1777–1851) и французским математиком и физиком Жозефом Фурье (1768–1830) независимо. С помощью термобатареи (с последовательно соединенными термоэлементами) можно было обнаруживать инфракрасное излучение от человека на расстоянии 10 м.

Кадмий-ртуть-теллур (КРТ), HgCdTe , является наиболее широко используемым инфракрасным детектором из-за его высокой квантовой эффективности и самого низкого темнового тока среди всех материалов инфракрасных детекторов. Длину волны отсечки детекторов КРТ можно установить в широком диапазоне от 800 нм до 1.6 мкм. HgCdTe - полупроводник с атомами (Hg, Cd) из столбца II периодической таблицы и атомами (Te) из столбца VI. Теллуриды HgTe и CdTe имеют кристаллическую структуру сфалерита (ZnS), состоящую из двух проникающих гранцентрированных кубических решеток (рис. 4а). Смешанные кристаллы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ могут быть получены с любой концентрацией Hg и Cd. Это позволяет изменить ширину запрещенной зоны E_g от 0 эВ для HgTe ($x = 0$) с металлическими свойствами до 1.5 эВ для CdTe ($x = 1$) с полупроводниковыми (рис. 4б). Квантовая эффективность детектора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ зависит от подложки (рис. 5а).

КРТ может использоваться в качестве полупроводникового слоя в КМОП-матрице детекторов с 16 миллионами пикселей, расстояние между которыми не более 10 мкм (рис. 5б) [1]. С помощью такого датчика матричного типа можно различить температуру людей и фон. Пространственное разрешение зависит количества сенсорных элементов в детекторе и от параметров сенсоров.

Термография — это метод визуализации температуры поверхности объектов. Интенсивность инфракрасного излучения, исходящего от небольшой области объекта («точки объекта»), интерпретируется как мера его температуры. Первое распределение температуры на поверхности (так называемые «тепловые изображения») было получено Гершелем в 1840 году благодаря разной скорости испарения тонкой масляной пленки на бумаге. Технология визуализации коренным образом изменилась с развитием полупроводниковых детекторов. В настоящее время тепловизионная камера преобразует тепловое излучение, невидимое для человеческого глаза, (инфракрасный свет) от объекта или тела на большом расстоянии с помощью специальных датчиков с последующей компьютерной обработкой. В результате может быть значительно расширен диапазон измерения температуры (динамический диапазон), а также повышена точность измерения (могут быть определены крошечные перепады температур).

Изображения, полученные с помощью инфракрасных камер, изначально доступны как информация об интенсивности. Тепловизионные камеры обычно отображают их в оттенках

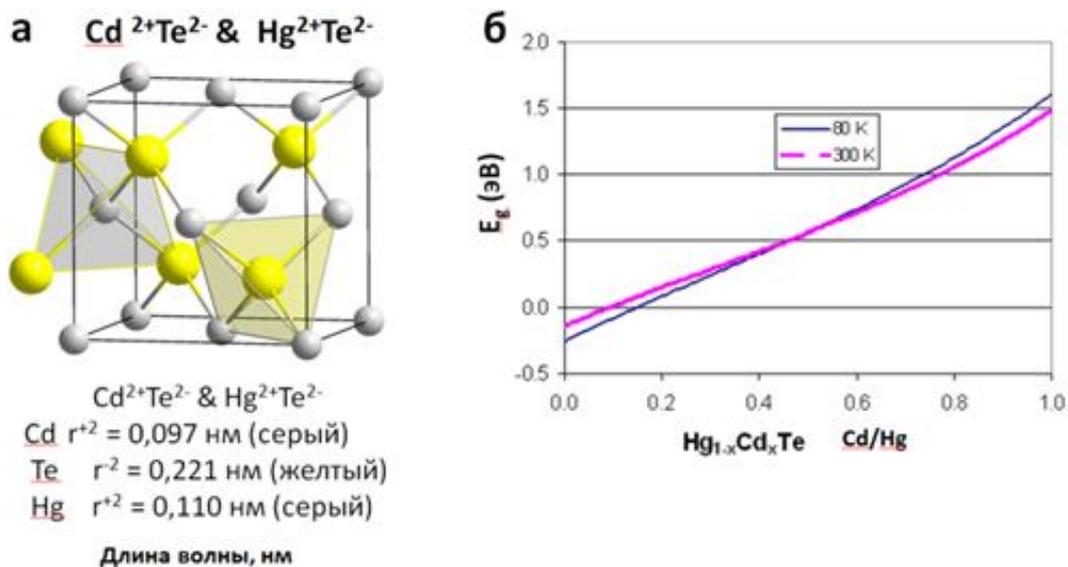


Рисунок 4 – Наиболее широко используемым полупроводниковым детектором инфракрасного излучения является $Hg_{1-x}Cd_xTe$, который представляет собой смешанный кристалл теллурида ртути (HgTe) и теллурида кадмия (CdTe): а - $Hg_{1-x}Cd_xTe$ может производиться в любой концентрации с x от 0 до 1; б - при различных концентрациях Cd и Hg можно изготавливать полупроводниковые детекторы с чувствительностью в диапазоне длин волн от 800 нм до 1.5 мкм

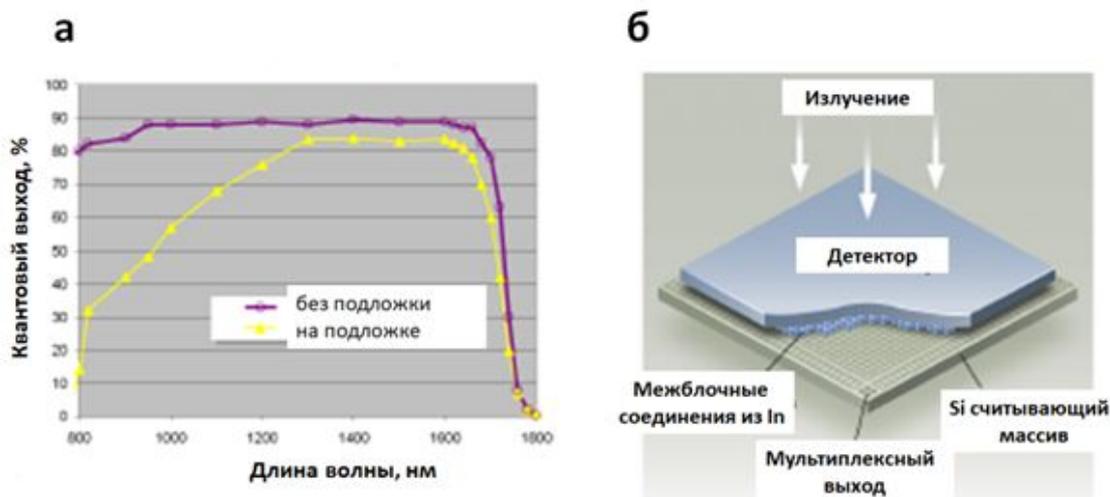


Рисунок 5 – Инфракрасный детектор $Hg_{0.38}Cd_{0.62}Te$ ($E_g = 0.8$, $\lambda_g = 1.55$ мкм) на подложке CdZnTe от фирмы Teledyne Space Imaging (Великобритания): а - квантовая выход (%) в зависимости от длины волны (с подложкой и без нее); б - матрица новейшего детектора с 16 млн пикселей (шаг пикселя 10 мкм) [1]

серого фона, и хорошие камеры могут разрешать до 256 уровней. Однако человеческий наблюдатель не может различить такие тонкие оттенки. Поэтому принято создавать изображения в «искусственных цветах» с помощью компьютерной программы. Цветовое изображение дает для глаз больше различий, чем чистая разница в яркости серого. На изображении, окрашенном таким образом, «яркость» (температура) представлена изменением отображаемого цвета. Для раскрашивания изображений температуры применяют различные цветовые палитры. Обычно самая светлая (самая теплая) часть изображения - белая,

промежуточные температуры показаны желтым и красным тонами, а темные (более холодные) части изображения показаны синими тонами (рис. 6).

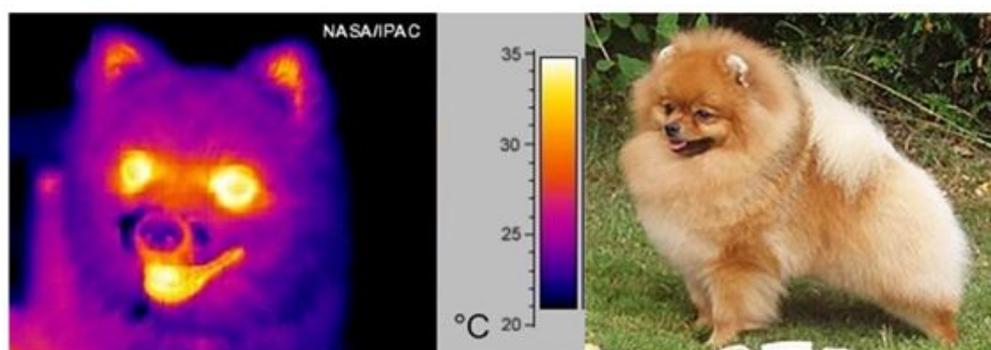


Рисунок 6 – Термография инфракрасного излучения с поверхности собаки шпица, записанная с детектором в средней инфракрасной области: изображение в «искусственных цветах» (слева) со шкалой цветовой температуры; справа - нормальное фото собаки.

2. Инфракрасное излучение и обработка информации

Группа исследователей из Шанхайского университета Цзяо Тонг (*Shanghai Jiao Tong University*), возглавляемая профессором Тао Дэн (*Tao Deng*), обнаружила, что человеческая рука может использоваться в качестве эффективного и бесплатного источника инфракрасного света в различных областях [3]. Рука излучает инфракрасный свет в виде теплового излучения, которое отличается от окружающей среды (температура тела человека немного выше). Китайским физикам удалось отличить инфракрасное излучение руки от окружающей среды (рис. 7). Они обнаружили, что руку в целом, а также отдельные пальцы можно использовать в качестве мультиплексных источников инфракрасного света (рис. 8). Ключевую роль здесь играют различия в интенсивности инфракрасного излучения между человеческой рукой и фоном. Решением проблемы стала разработка новых материалов с программируемым селективным отражением. Для этого использовались полидиметилсилоксан (Polydimethylsiloxane, PDMS) с низким коэффициентом отражения ($\sim 41\%$) и алюминий с высоким коэффициентом отражения (99%). Комбинируя алюминий с тонким слоем PDMS можно создавать шаблоны и решетки для обработки информации. Хотя интенсивность инфракрасного излучения руки и окружающей среды мало отличается (рис. 7), отражение ИК-излучения от руки увеличивает соотношение интенсивностей и открывает различные приложения для информационных процессов, включая криптографию.

Криптография (древнегреческий *κρυπτος* - скрытый, секретный и *γραφειν* - писать) означает секретное письмо. Исторически сложилось так, что криптография занимается созданием и описанием процедур «тайного письма», то есть процедур шифрования. Первые применения криптографии были уже в древних цивилизациях. Эпоха современной криптографии началась с Клода Шеннона (*Claude Shannon*, 1916-2001), профессора Массачусетского технологического института и основателя теории информации (Премия Альфреда Нобля Американского общества инженеров-строителей – *The Alfred Noble Prize of the American Society of Civil Engineers*, 1939). В 1949 году он опубликовал статью

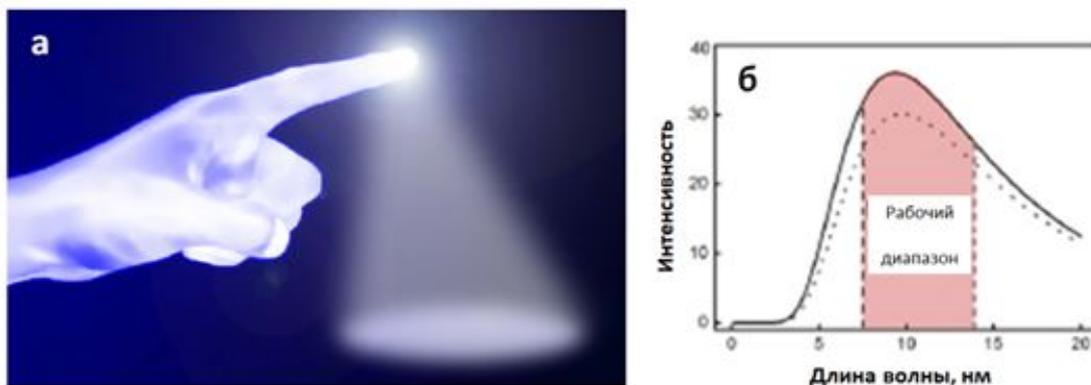


Рисунок 7 – Инфракрасное излучение руки и пальца может быть использовано для технических приложений: а - инфракрасное излучение пальца, б - спектр руки (черная линия) и окружающей среды (точки); указан рабочий диапазон инфракрасного излучения, применяемый для обработки информации [3]

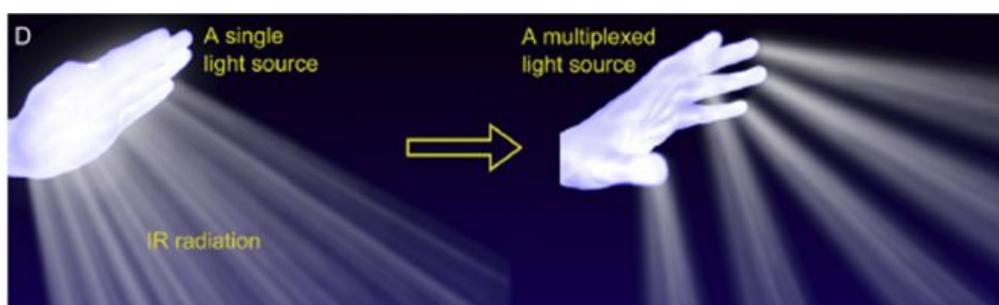


Рисунок 8 – Для технических приложений можно использовать инфракрасное излучение всей руки (слева), а также отдельных пальцев (справа) [3]

«Коммуникационная теория секретных систем» [4]. Эта статья, наряду с другими его работами по теории информации, заложила математическую основу криптографии. Визуальная криптография разработана в двадцатом веке. Визуальная криптография позволяет зашифровать информацию, доступную в виде белых и черных пикселей или оптических шаблонов. Расшифровка может быть сделана с помощью оптических процессов, без помощи компьютера. Этим методом занимались исследователи профессора Тао Дэна из Шанхайского университета Цзяо Тонг [3].

Для визуальной криптографии китайские физики использовали отраженное инфракрасное излучение от отдельных пальцев, которое направлялось на специальные шаблоны (дифракционные решетки, рис. 9). С каждой решеткой была связана особая информация или символ. Используя несколько решеток и комбинацию пальцев, можно сделать видимыми разные символы (на рис. 10 – разные числа).

Продемонстрировав избирательное взаимодействие между пальцами и решетками, китайские исследователи обнаружили относительно хорошую корреляцию. Необходимо выровнять пальцы в определенных положениях. Таким условием является не только избирательное взаимодействие, но и устранение помех ИК-излучения от других частей тела. В будущем решетки можно поставить в удобную конфигурацию, чтобы зафиксировать положение между пальцами и решетками. Результаты открывают возможность использования не только человеческой руки, но и потенциально других частей человеческого тела в функциональных системах и процессах [3].

Использование руки человека в качестве источника инфракрасного света - дело новое и звучит немного необычно. Профессор Тао Дэн надеется, что это приложение будет очень

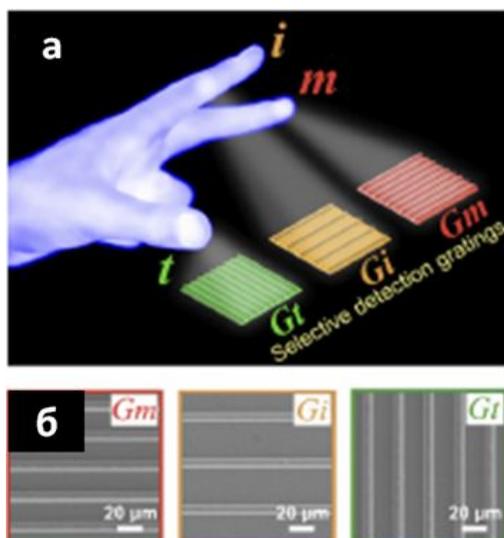


Рисунок 9 – Взаимодействие между пальцами и дифракционными решетками для шифрования/дешифрования информации: а - каждая решетка соответствует определенной информации; б - изображения решеток (G_m , G_i , G_t) в сканирующем электронном микроскопе [3]

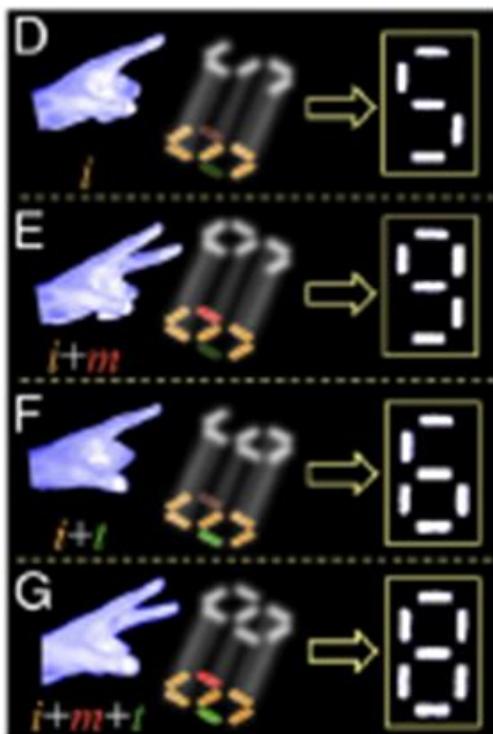


Рисунок 10 – Восстановление зашифрованных символов от дифракционных решеток (D, E, F, G) с помощью различных комбинаций пальцев: решетка D делает видимым число 5, решетка E - 9, решетка F - 6 и решетка G - 8 [3]

универсальным [3]. Будущее покажет. Что касается новых приложений, то имеет смысл учитывать мнение успешного изобретателя и основателя современной электротехнической промышленности Вернера Сименса, который заявил: «Только не произносите смертоносное слово «Это невозможно».

Список литературы

- 1 Paul Jerram and James Beletic, Teledyne's High Performance Infrared Detectors for Space Missions, 9 p. [Электронный ресурс] - URL: <https://www.teledyne2v.com/content/uploads/2018/10/Teledynes>. (дата обращения: 06.05. 2021)
- 2 Na Yang, Qiankun Gao, Yishi Shi, Visual-cryptographic image hiding with holographic opticalements, Optics Express, 24(26), 2018. [Электронный ресурс] - URL: <https://doi.org/10.1364/OE.26.031995> (дата обращения: 06.05. 2021)
- 3 Shun Ana, Wen Shanga, Modi Jianga, Yini Luoa, Benwei Fua, Chengyi Songa, Peng Taoa, and Tao Denga, Human hand as a powerless and multiplexed infraredlight source for information decryption and complexsignal generation, PNAS 2021 Vol. 118 No. 15, 1 – 10, e2021077118. - URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2021077118> (дата обращения: 06.05. 2021)
- 4 Shannon, Claude. // "Communication Theory of Secrecy Systems". Bell System Technical Journal. - 1949. - 28. - 4. - P. 656–715.

Сведения об авторах:

Шварц К. - академик Латвийской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор GSI (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца), Дармштат, Германия.

Даулетбекова А.К. - кандидат физико-математических наук, профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Нур-Султан, Казахстан.

Сорокин М. - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия.

Schwartz K. - Academician of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of GSI (Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Darmstadt, Germany.

Dauletbekova A. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukhan str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Sorokin M. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Senior Researcher at the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow.