

УДК 621.383

**ОПТИЧЕСКИ ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЕ ФОТОННЫЕ БЛОКИ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
OPTICALLY SWITCHED PHOTONIC BLOCKS DESIGNED FOR LOGIC
ELEMENTS**

К.Е. Латышенко, Н.В. Гарбузов

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

K. Latyshenko, N. Garbuzov

Supervisor – T. Zhukouskaya, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: Статья рассматривает разработки логических микросхем с использованием фотонов и работу недавних стратегий.

Abstract: The article examines the development of logic microcircuits using photons and their operation of recent strategies.

Ключевые слова: фотоны, «включаемые» фотопереключателы, логические схемы.

Key words: photons, «turn-on» photoswitches, logic circuits.

Введение

На сегодняшний день мы имеем логические схемы, использующие электроны. Такие схемы зависят только от количества подаваемых электронов на сигнал, то есть функционал ограничен только сигналом «1» и «0».

С другой стороны, мы имеем фотоны, от которых мы можем использовать не только интенсивность, то есть количества фотонов, но и длину волны и степень поляризации, что делает передачу информации более гибким делом, так же само использование фотонов даст очень высокую скорость передачи информации и высокую плотность хранения информации.

Конечно же реализация такой идеи сложна, потому что нужны устройства, обладающие фотонной стабильностью, быстрым откликом, высокой усталостной прочностью и тому подобное. Перспективу для решения такой проблемы представляют фотопереключаемые молекулы.

Основная часть

Старые стратегии по созданию фотонных логических цепей.

Фотопереключаемые молекулы могут преобразовываться между двумя бистабильными изомерными формами путем поглощения света двух разных длин волн, что позволяет оптически кодировать информацию с присутствием или отсутствием специального изомера.

В старых стратегиях использовали фотохромизм для реализации полностью фотонных логических функций для управления эффективностью передачи энергии и заряда между фотопереключателами и молекулами красителя. Но, как показала практика, для некоторых функций на выходе всё подходит изменению поглощения на определенной длине волны, но для других надо было провести расчёт или спектральный анализ, что было не очень удобно.

«Включаемые» фотопереключателы.

Недавно были открыт новый класс фотохромических молекул, которые флуоресцентны при фотоциклизации и называют «включаемыми» фотопереключателями. Облучение ультрафиолетовым светом приводит к циклизации низкоэмиссионного (LE) изомера, преобразуя его в высокоэмиссионный (HE) изомер, который можно исследовать при видимом спектре света. Но свет, который используют для исследования эмиссии, может вызвать процесс цикловерса, что, конечно, приведёт к LE изомеру. Так «включаемые» фотопереключатели могут переключаться между LE и HE состояниями. HE и LE можно считать как «1» и «0».

Работа «включаемых» фотопереключателей в устройстве.

Как и писалось выше, фотопереключатели могут переключаться в HE и LE состояния. При ультрафиолетовом диапазоне (280-350 нм) будет HE, при видимом (420-520 нм) будет LE (рис. 1).

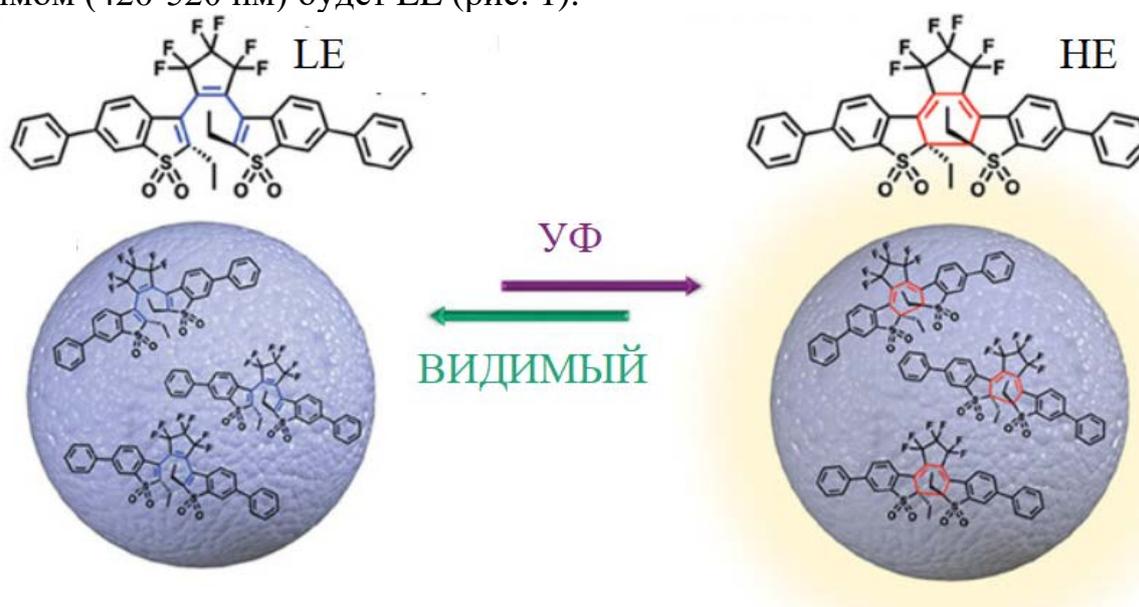


Рисунок 1 – Вид молекул при LE и HE состояниях

Для иммобилизации фотохромные молекулы были включены в нанополлистирола диаметром ≈ 310 нм. Таким образом, каждая отдельная бусина вмещает ≈ 106 молекул. Так можно переключаться между LE и HE сотни раз без деградации и так же бусинки с фотопереключателями полностью контролируются светом.

Загруженные красителем бусины были собраны в 2D-решетку, сочетающую электрофоретическое осаждение и электронно-лучевую литографию (EBL), называемую поверхностно-шаблонной электрофоретической депозицией (STEPD). С помощью STEPD электрически заряженные наночастицы могут быть размещены под воздействием внешнего электрического поля на предварительно определенном шаблоне, который был подготовлен с помощью EBL. Это позволяет создавать сборки наночастиц большой площади с высокой точностью.

Допустим рассмотрим пример на рисунке 2.

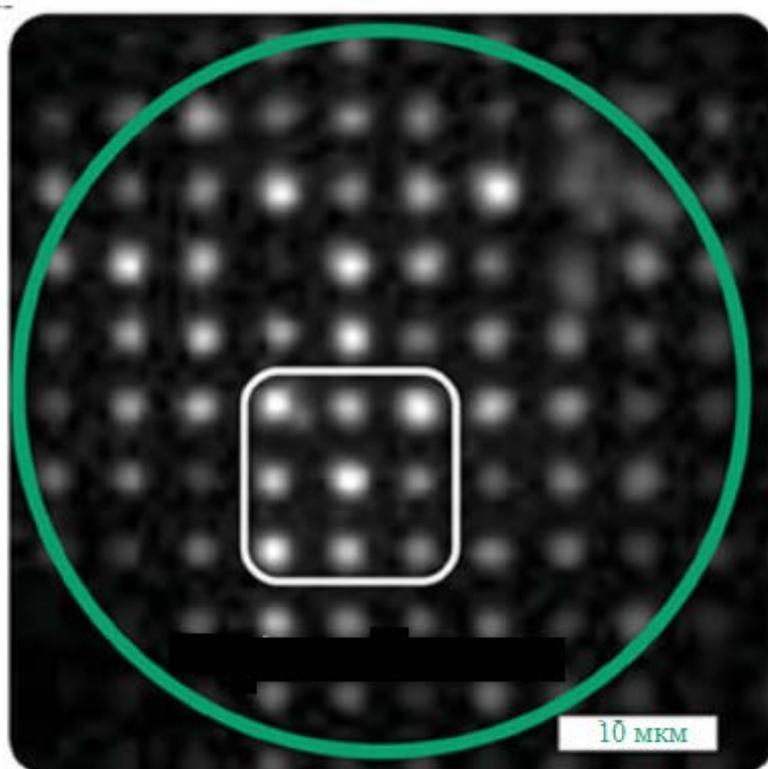


Рисунок 2 – Пример массива наночастиц PS, расположенных на сетке размером 5 мкм × 5 мкм с использованием метода STEPД

Образец был прикреплен к пьезоэлементу для точного перемещения массива, а ячейка была смонтирована в самодельной двухсветовой микроскопической установке для переключения и возбуждения отдельных бусин. Зеленый круг на рисунке 2 относится к области диаметром ≈ 70 мкм, которая освещается видимым светом, а белый квадрат относится к области интереса, которая вмещает 3×3 полимерных бусины.

Флуоресцентные изображения из этой области показаны на рисунке 3 в увеличенном масштабе.

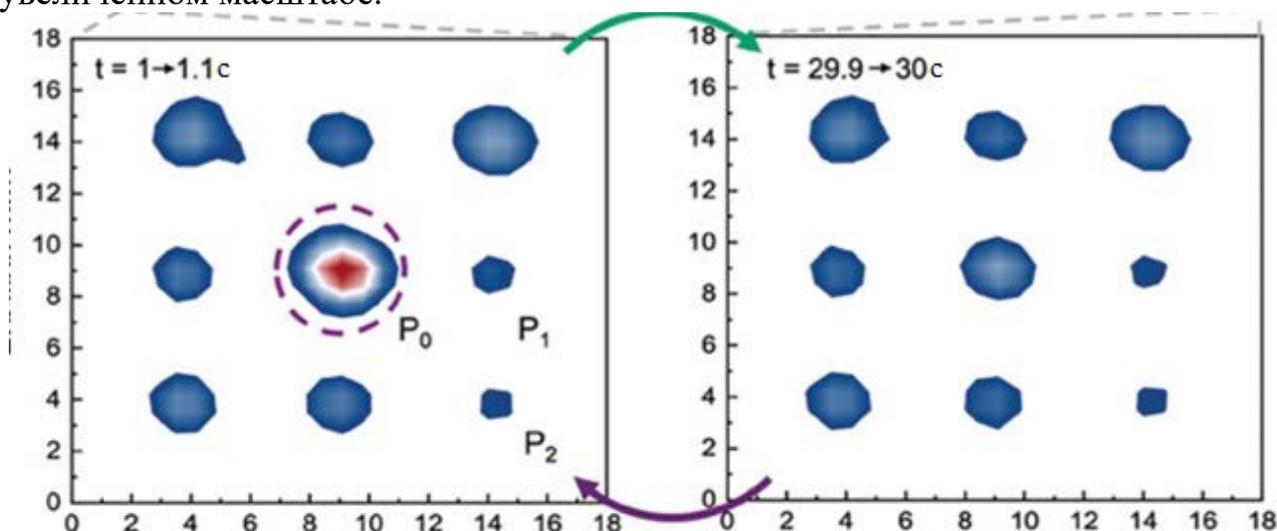


Рисунок 3 – Флуоресцентные изображения области интереса для оптического цикла

Они были получены путем фокусировки УФ-света в течение 1 с на бусине P_0 в центре (пунктирная фиолетовая линия) и последующего зондирования

флуоресценции от всех девяти бусинок путем возбуждения видимым светом в течение 29 с, то есть общая продолжительность одного цикла составляет 30 с. Два изображения на рисунке 3 были накоплены в течение первых 100 мс (слева) и последних 100 мс (справа) воздействия видимого света. Только для бусины P₀, хромофоры которой были инициализированы в состоянии HE, наблюдается сильный сигнал флуоресценции при освещении видимым светом, рис. 3 слева, тогда как сигнал от других бусин остается на низком уровне. Важно, что по мере продолжения видимого освещения интенсивность излучения, зарегистрированная от бусины P₀, спадает до уровня LE в масштабе времени в несколько секунд, рис. 3 справа. Это сравнивается более количественно на рисунке 4 для P₀ и одной из его ближайших соседних бусин, P₁.

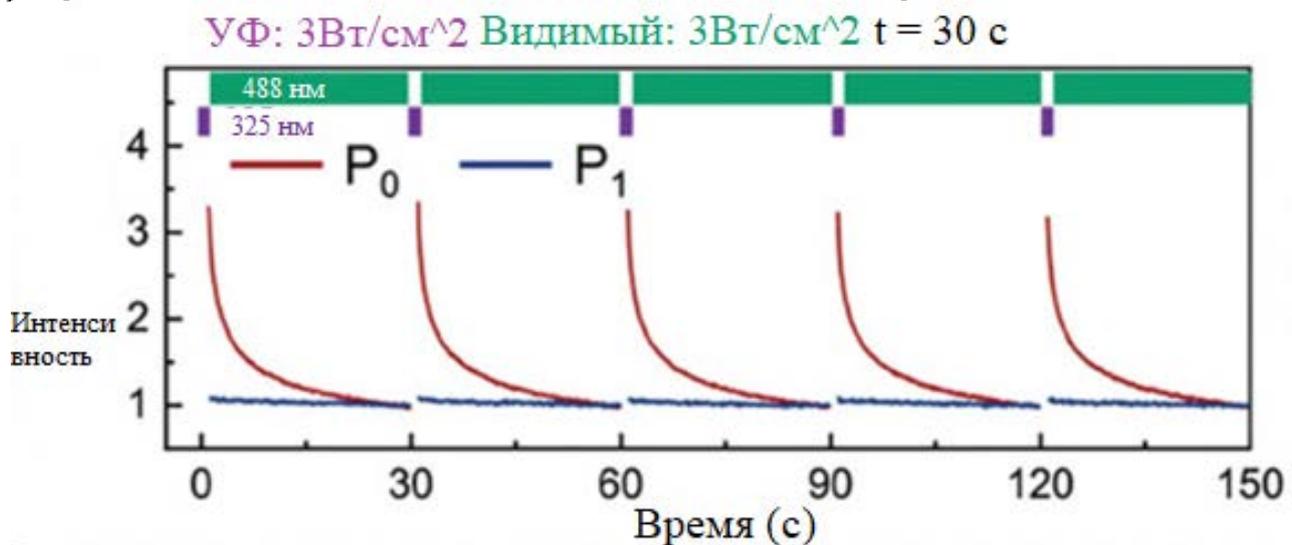


Рисунок 4 – Реакция нормализованной интенсивности излучения (левая ось), как функция времени для бусин P₀ (красная линия) и P₁ (синяя линия) для пяти последовательных циклов освещения

На рисунке показана нормализованная интенсивность излучения этих шариков для пяти последовательных циклов УФ-видимого. Высокая степень воспроизводимости пяти циклов иллюстрирует обратимость процесса переключения. С другой точки зрения, это можно интерпретировать как повторение чисто оптических циклов записи-чтения-стирания. УФ-свет записывает часть информации в нанобусину, которая может быть считана флуоресценцией при возбуждении видимого света. Длительное возбуждение видимого освещения стирает эту информацию и очищает шарик для нового цикла записи. Чтобы точнее количественно оценить этот оптический цикл, мы определяем контраст как функцию времени как:

$$C(t) = \frac{I_{max} - I(t)}{I_{max}} = 1 - \frac{I(t)}{I_{max}} \quad (1)$$

где I_{max} относится к интенсивности излучения, которая получена в начале периода освещения 488 нм, а $I(t)$ относится к интенсивности в момент времени t в течение периода освещения 488 нм.

Поскольку видимое излучение также преобразует молекулы в состояние LE, $I(t)$ уменьшается как функция времени, и максимальный контраст между

уровнями HE и LE достигается для больших времен освещения 488 нм. Другими словами, стирание информации из предыдущего цикла записи происходит тем полнее, чем дольше бусина подвергается воздействию VIS-света.

Для бусин P_0 (красная линия) и P_1 (синяя линия) временное развитие контраста сравнивается на рисунке 5.

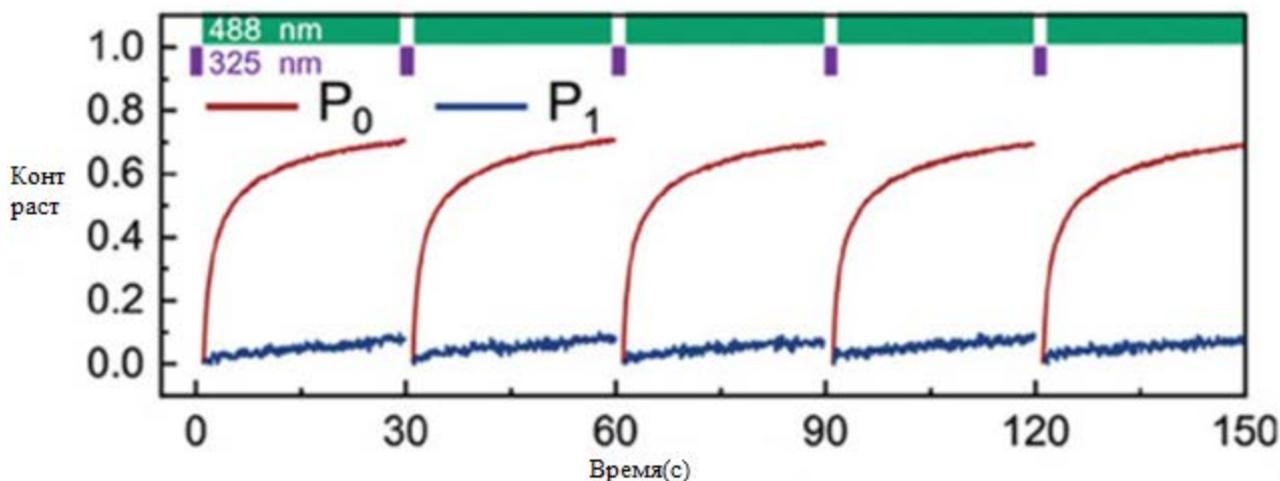


Рисунок 5 – Контраст $C(t)$ для бусин P_0 (красная линия) и P_1 (синяя линия) для пяти последовательных циклов освещения

Для P_0 он показывает крутой подъем от 0 до 0,5 в течение нескольких секунд в начале времени освещения 488 нм и насыщается при более длительном времени при $\approx 0,7$. Для P_1 этот параметр показывает лишь небольшое изменение в зависимости от времени от 0 до $\approx 0,1$ после 30 с.

Оптимизация.

Очевидно, что контраст, который может быть достигнут для конкретной бусины, является функцией интенсивности освещения двух конверсионных лучей и продолжительности времени цикла. Поэтому для оптической записи/считывания/стирания информации важно найти наилучшее сочетание этих параметров для достижения наибольшей мощности между сигналами.

Для определения оптимальных рабочих параметров, а также для обзора производительности переключения фотонных единиц, все комбинации интенсивностей возбуждения в диапазоне от 1 до 6 Вт/см² для видимого спектра и 2–7 Вт/см² для УФ (оба с шагом 1 Вт/см²) были протестированы для времени цикла $t = 5, 10, 20, 30, 40$ и 50 с. Это дает в общей сложности шесть матриц интенсивности 6×6 для максимального контраста, и они показаны на рисунке 6.

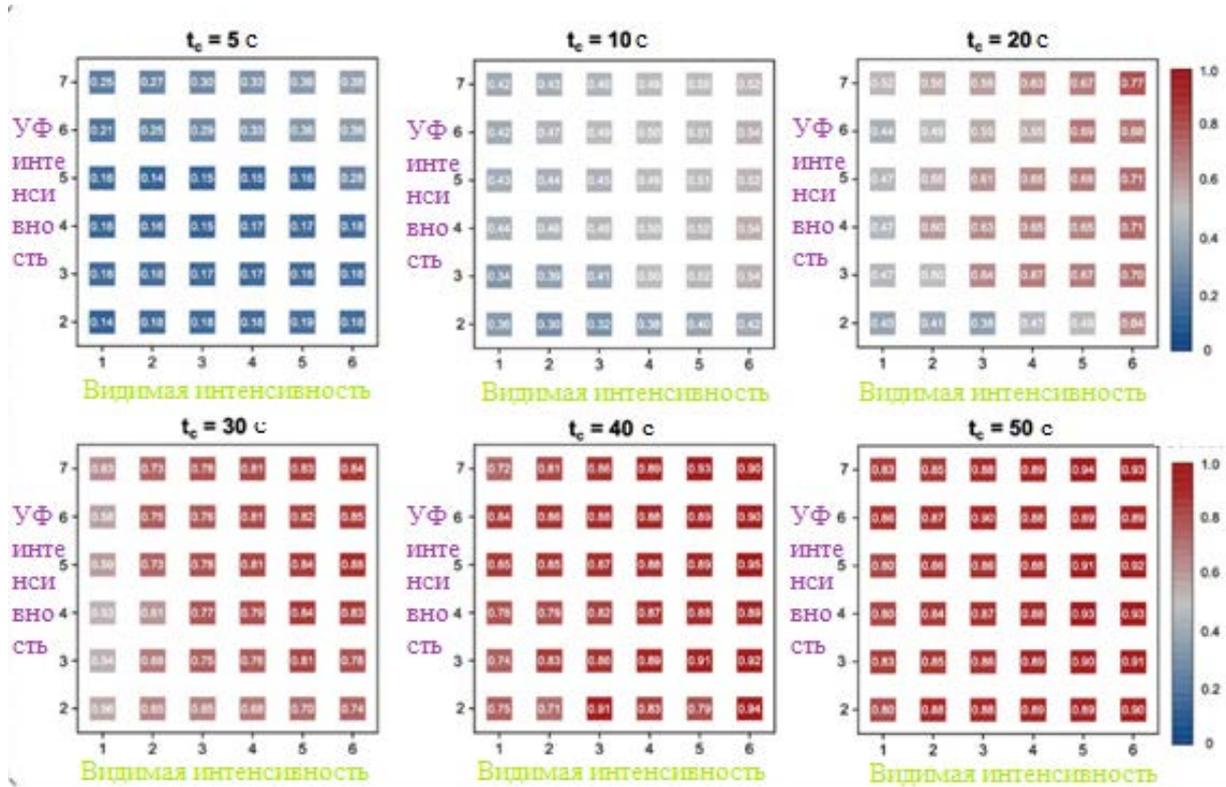


Рисунок 6 – Максимально достижимая контрастность в зависимости от интенсивности УФ- и видимого излучения для времени цикла 5, 10, 20, 30, 40 и 50 с, сверху слева направо вниз

Учитывая, что интенсивность УФ-излучения не должна превышать 3 Вт/см^2 для уменьшения перекрестных помех, и что увеличение времени цикла с 30 до 50 с дает лишь умеренное увеличение максимального контраста, мы использовали время цикла $t = 30 \text{ с}$ и интенсивность возбуждения 3 Вт/см^2 для обеих длин волн для проведения дальнейших экспериментов. Этот выбор является хорошим компромиссом между высоким контрастом, подавлением перекрестных помех и продолжительностью эксперимента, что идёт в плюс к фотостабильности.

Показанные на данный момент результаты показывают, что загруженные шарики в массиве могут быть избирательно адресованы для фотохромного переключения. Таким образом, информацию можно закодировать в узоре, выборочно перемещая бусины одну за другой в УФ-фокус.

Цикл записи-чтения-стирания.

С характеристикой, показанной выше, у нас теперь есть ингредиенты для демонстрации чисто оптических циклов записи-чтения-стирания на микроструктурированных поверхностях. Стандартная применяемая процедура выглядит следующим образом:

- Инициализация: Поскольку молекулы DAE в состоянии LE дают слабый сигнал флуоресценции, интересующая область образца освещается в течение 2 с видимым светом мощностью 3 Вт/см^2 для преобразования любой равновесной смеси изомеров LE и HE в форму LE, чтобы можно было определить стандартизированный фон LE;
- Запись: С помощью пьезоэлемента шарик PS перемещается в фокус УФ-

света и облучается в течение 1 с (3 Вт/см^2). Это преобразует молекулы этого конкретного шарика в состояние HE. Затем выбирается следующий шарик и помещается на 1 с в УФ-фокус путем перемещения пьезоэлемента. Это повторяется для столько бусинок, сколько требуется для кодирования определенной информации в микроматрице бусинок. В конце этой процедуры матрица содержит выбранную группу бусинок, которые содержат молекулы DAE, «спящие» в состоянии HE;

- Считывание: вся область образца освещается в течение 1 с светом VIS (3 Вт/см^2). Это приводит к сильной флуоресценции от тех PS-бусинок, молекулы которых были переведены в состояние HE;
- Стирание: образец освещается в течение 18 с видимым светом с интенсивностью 9 Вт/см^2 . Повышенная интенсивность видимого света применяется для ускорения восстановления молекул из состояния HE обратно в состояние LE. Важно отметить, что интенсивность видимого света, применяемая во время инициализации (шаг 1) и считывания (шаг 3), должна быть одинаковой для правильного учета фона.

В качестве простого доказательства эффективности этой оптической системы кодирования буквы алфавита были последовательно записаны на той же матрице бисера PS размером 5×5 в образце (рис. 7).

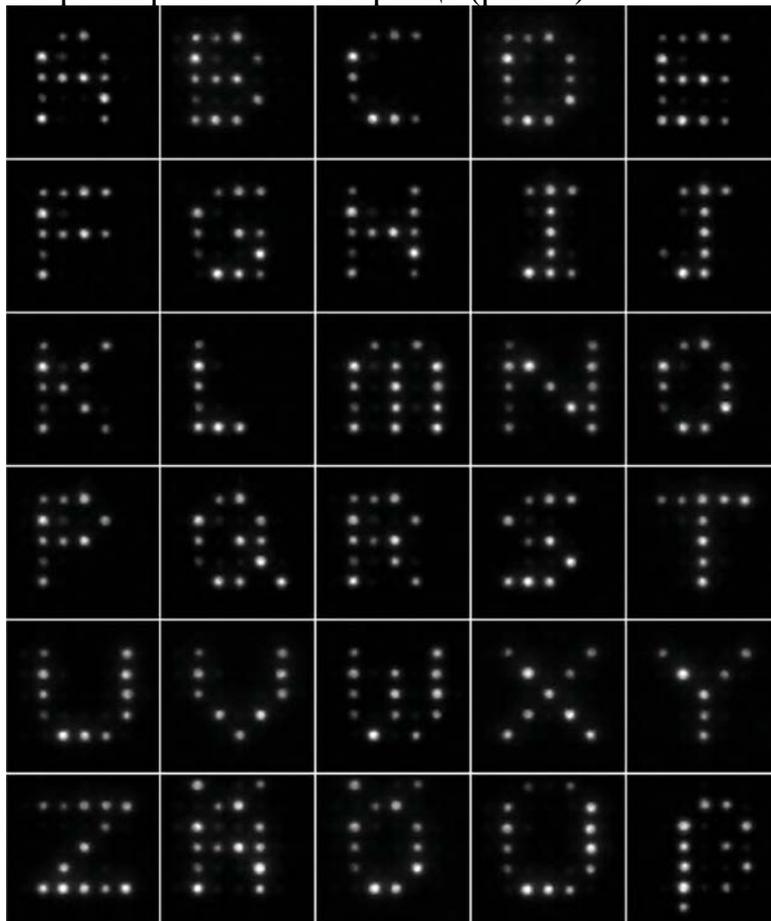


Рисунок 7 – Результат кодирования алфавита

Заключение

Фотонные устройства имеют потенциал стоять на ряду с электронными, если не вытеснить электронные устройства. Если мы освоим фотоны, то получим

больше скорости передачи информации, гибкость и большую плотность хранения информации.

На данный момент наибольшую перспективу представляет использование «включаемых» фотопереключателей, что уже ближе к реализации фотонных устройств на практике.

Литература

1. Purely Optical, Reversible, Read-Write-Erase Cycling Using Photoswitchable Beads in Micropatterned Arrays – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.202401029>. – Дата доступа: 21.10.2024