

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СКРЫТОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

П.А. Тарасов¹, А.А. Григорьев², Е.А. Исаев³, Г.В. Детков⁴

¹ *Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия*

² *Финансовый университет при правительстве Российской Федерации, Москва, Россия*

³ *Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук*

⁴ *ООО "Информационные технологии и электронные коммуникации", Москва, Россия*

E-mail: PTarasov@Hse.ru

1. Временной плащ

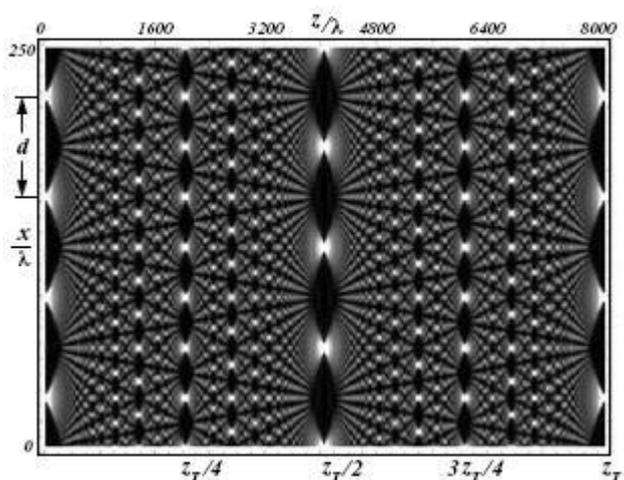


Рис. Оптический эффект монохроматического света. Монохроматический свет падает слева на экран, включающий четыре щели. Расположенные по бокам зеркала отражают свет во внутреннюю область. В результате такого отражения ковер Тальбота может воспроизводиться с периодом.

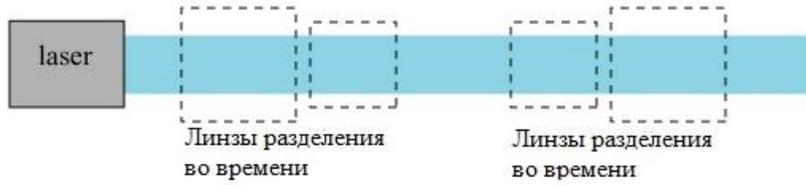
В 2010 году была теоретически предсказана возможность создания интерференционной картины во времени, а не в пространстве. Принцип создания временного кармана следующий: лазер с фиксированной частотой проходит через «расщепленную линзу», которая создает смещение для красного и синей частей луча. Когда этот участок проходит в оптическое волокно, обычная дисперсия заставляет синие части ускоряться, а красные части замедляться, создавая зазор. В области события запускается оптическое событие, которое обычно воздействует на луч, но которое попадает в зазор и поэтому «становится скрытым». Затем свет попадает в волокно с компенсацией дисперсии, которое обладает свойствами, противоположными дисперсии обычного волокна - синие части движутся медленнее, а красные – быстрее. Это приводит к закрытию промежутка, но луч все еще имеет сегменты со смещением красного и синего. Второй объектив с разделенным временем меняет эффект первого и снимает частотные сдвиги, возвращая луч в исходное, чистое состояние.

Первая установка, демонстрирующая эффект «дифракционного» или «временного» кармана, была продемонстрирована в 2011 году в волноводных коаксиальных лазерах [1].

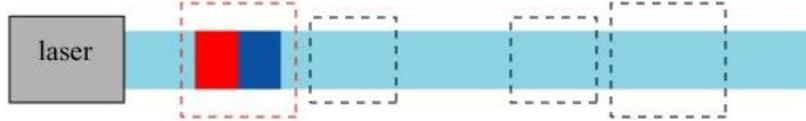
В работе [2] представлена электрически управляемая кремниевая временная линза, с возможностью создания временного кармана длиной от 0,449 нс до 3,35 нс и скоростью передачи данных в кармане до 200 МБ/сек. Также в работе указана возможность использования линзы для коммерческих целей.

1. [1] M. Fridman, A. Farsi, Y. Okawachi, A. Gaeta. Demonstration of temporal cloaking. arXiv:1107.2062. (2011).
2. [2] Z. Feng, Y. Siqu et al. Field-programmable silicon temporal cloak. Nat Commun 10, 2726 (2019) doi: 10.1038 / s41467-019-10521-5

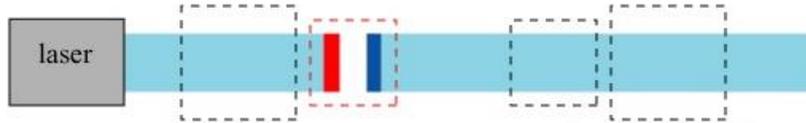
Система до сокрытия



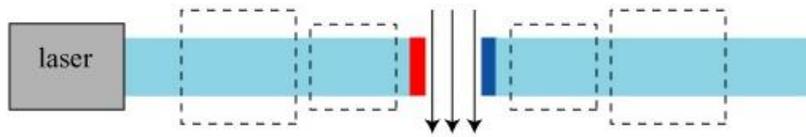
Часть луча «расщепляется» на красный и синий свет



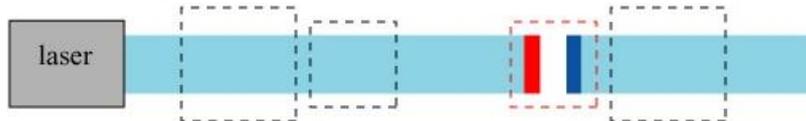
Синяя часть движется быстрее, Красная часть движется медленнее, открывая зазор



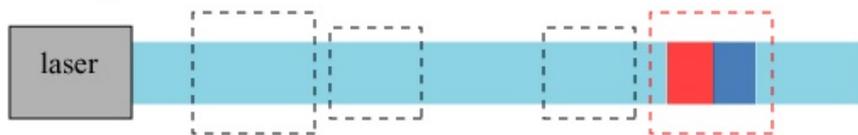
События в зазоре скрываются



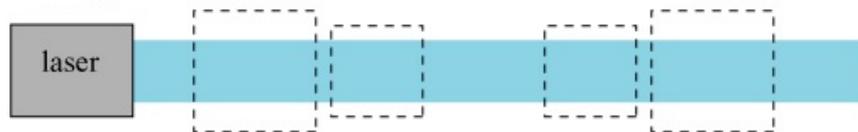
В области сокращения красная часть луча начинает двигаться быстрее, синяя- медленнее



Линза разделения во времени отменяет красное и синее смещение



Лазерный луч выходит из системы без какого-либо очевидного нарушения



2. Оптическая стеганография

Под этим термином понимается невозможность нарушителем определить сам факт передачи информации в общедоступных волоконно-оптических линиях связи на физическом уровне сети. Эта тема является относительно новой, и в научной литературе имеется всего лишь несколько публикаций, посвященных данной тематике.



Оптическая стеганография впервые была теоретически представлена в 2006 году [3], и впервые продемонстрирована в 2007 году [4]. В работах именно шум ASE (Amplified spontaneous emission), - шум усиленного спонтанного излучения) используется в качестве несущей скрытого сигнала. Этот шум возникает в эрбиевых оптических усилителях EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) [Рис]. Данные усилители благодаря возможности одновременного усиления сигналов с различными длинами волн [5] получили широкое распространение в различных волоконно-оптических линиях связи, в том числе в сети Интернет.

Один из способов стеганографической передачи информации описан ниже. Защита информации в нем происходит на двух уровнях. Для сокрытия сигнала в спектральном домене он соответствует шуму ASE, а для маскировки сигнала во временном домене используется временная задержка и специальная фазовая маска. То есть для фазового демодулирования скрытого сигнала передатчик передаёт копию шума ASE без модуляции, и через промежуток времени, равный задержке, и известный получателю, передается копия шума ASE с наложенным скрытым сигналом. Более того, поскольку спектр ASE охватывает диапазон длин волн от 1520 нм до 1560 нм, диапазон 40 нм спектра может поддерживать несколько скрытых каналов. С помощью данной технологии удалось добиться скорости передачи в 500 Мб/сек в обычной 10 Гб/сек волоконно-оптической линии связи [6].

3. В. В. Wu and E. E. Narimanov. A method for secure communications over a public fiber-optical network. Opt. Express 14, 3738 (2006).
4. K. Kravtsov, B. B. Wu, I. Glesk, P. R. Prucnal, and E. Narimanov, Proc. IEEE/LEOS Annual Meeting, Oct 21-25, 2007, (Lasers and Electro-Optics Society 2007) 480.
5. A.S. Kurkov, O.E. Nanii. Erbium Fiber Optic Amplifiers. LIGHTWAVE russian edition №1 2003.
6. Optical steganography based on amplified spontaneous emission noise. B. Wu, Z. Wang, Y. Tian, M. Fok, B. Shastri, D. Kanoff, P. Prucnal. OSA Publishing, Optics Express, Volume 21, Issue 2, Page 2065. 2013.

3. Оптические метаповерхности

Оптические метаповерхности - это ультратонкие неоднородные среды с плоскими структурами наноструктур, которые могут манипулировать оптическими свойствами света в субволновом масштабе, которые в настоящее время стали предметом интенсивных исследований из-за беспрецедентного контроля распространения света. Метаповерхности сделали возможным высокоэффективное управление фазой и поляризацией с большими градиентами, что позволило использовать множество ультратонких оптических устройств [7].

1. Изображение, скрытое в поляризационном профиле светового луча

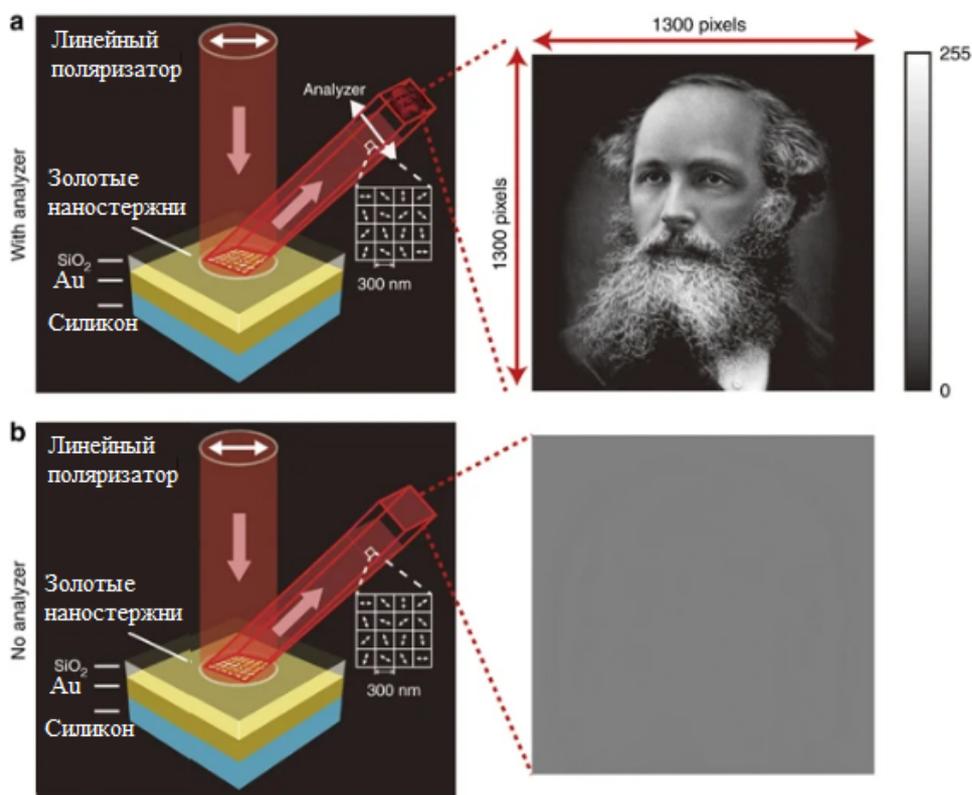


Схема для скрытия изображения в оттенках серого с высоким разрешением. При освещении линейно поляризованным светом генерируются два отраженных луча с пространственно изменяющимся профилем линейной поляризации, которые можно использовать для скрытия изображения с высоким разрешением в оттенках серого (1300 × 1300 пикселей и 256 уровней оттенков серого). Для демонстрации здесь показан только один отраженный луч. Два луча абсолютно идентичны, за исключением направления распространения. Скрытое изображение выявляется анализатором (линейным поляризатором) (**а**), без которого изображение не получается (**б**). Метаповерхность состоит из золотых наностержней с пространственно изменяющейся ориентацией наверху, SiO₂спейсер (85 нм) и золотой фоновый слой (150 нм) на кремниевой подложке. Изображение в градациях серого кодируется в профиль поляризации результирующего луча в субволновом масштабе через метаповерхность. Размер каждого пикселя составляет 300 × 300 нм, а общий размер изображения - 390 × 390 мкм.

2. Создание кода быстрого ответа (QR) для защиты от подделки [8]

С анализатором

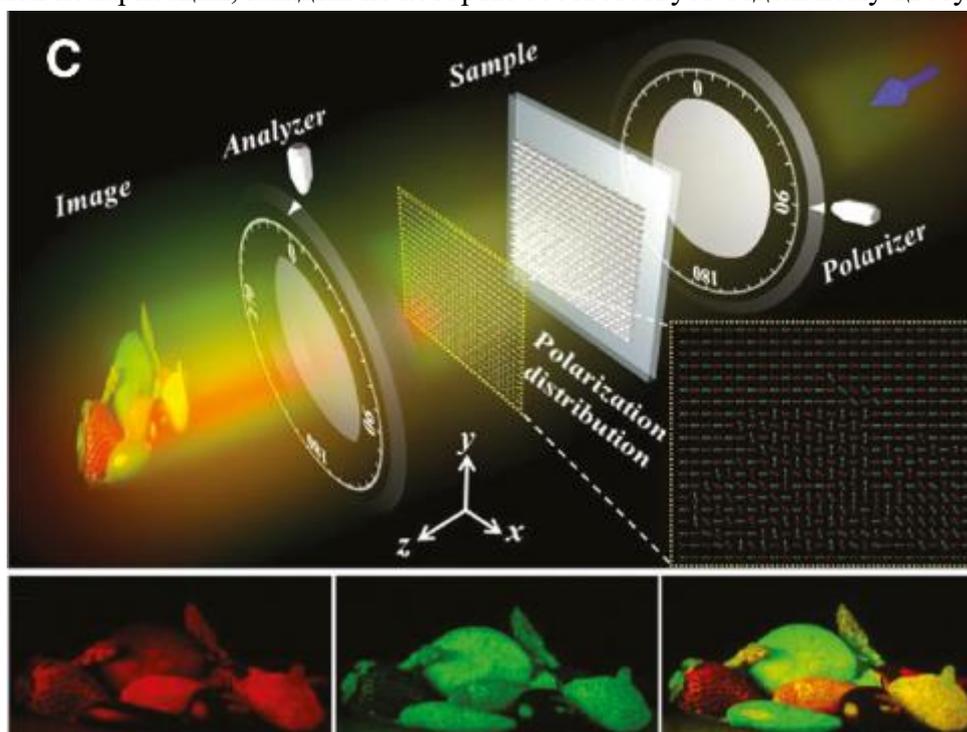


Без анализатора



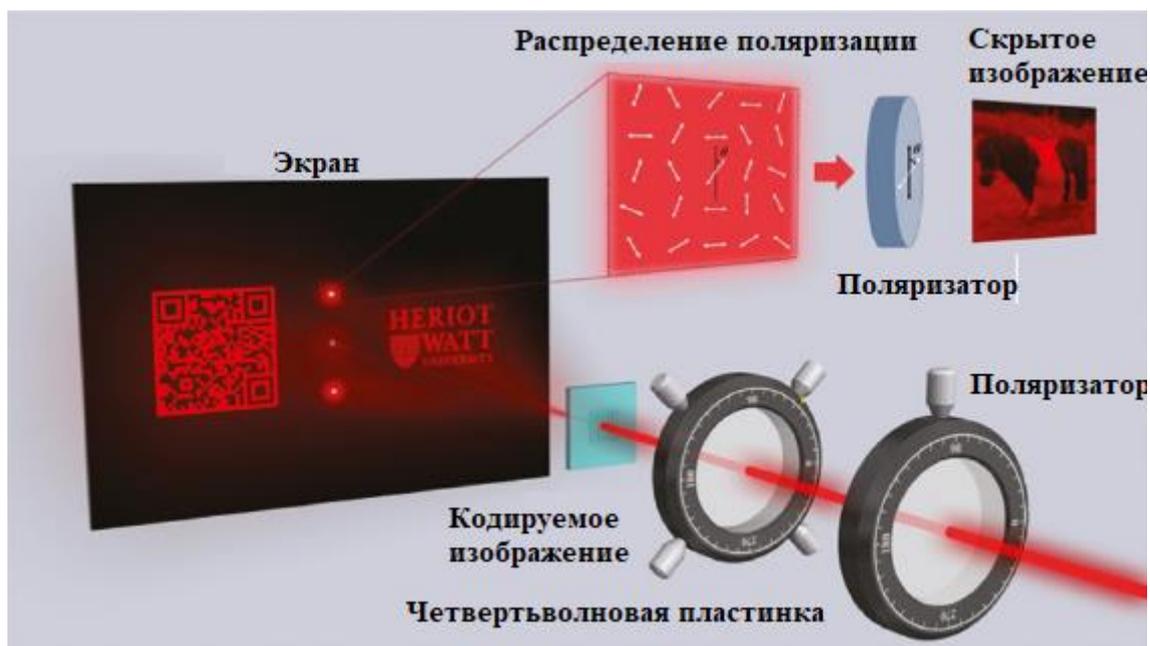
3. Цветное изображение, встроенное в метаповерхность

Платформа метаповерхности используется для одновременного кодирования информации о цвете и интенсивности в зависящий от длины волны профиль поляризации светового луча. Цветное изображение здесь мультиплексируется в несколько наборов профилей поляризации, каждый из которых соответствует отдельному цвету.



Вверху: схема цветного изображения с поляризационной кодировкой. Внизу: экспериментальные результаты для падающего света красного, зеленого и двух цветов [9].

4. Поляризационно-чувствительная голограмма со скрытым изображением



На рис. показано многоканальное устройство, которое может реализовать голограмму с переключаемым изображением и неоднородный профиль поляризации для защиты от подделки в разных каналах. Путем интеграции различных функциональных возможностей (мультиплексированных голограмм по спирали и произвольных манипуляций поляризацией) на одном и том же метаповерхностном устройстве может быть получено универсальное сверхкомпактное многоканальное устройство с минимальной занимаемой площадью. При освещении светом с линейной поляризацией в горизонтальном направлении изображение без анализатора не получается из-за равномерного распределения интенсивности. Скрытое изображение декодируется правильно только тогда, когда ось передачи анализатора расположена в вертикальном направлении [10].

7. Fuyong Y, Chunmei Z, Xiao-Fei Z, et al. High-resolution grayscale image hidden in a laser beam. *Light Sci Appl* 2018;7:17129.
8. Zhang C, Wen D, Yue F, Intaravanne Y, Wang W, Chen X. Optical metasurface generated vector beam for anticounterfeiting. *Phys Rev Appl* 2018;10:034028.
9. Zang X, Dong F, Yue F, et al. Polarization encoded color image embedded in a dielectric metasurface. *Adv Mater* 2018;30:1707499.
10. Zhang C, Dong F, Intaravanne Y, et al. Multichannel metasurfaces for anticounterfeiting. *Phys Rev Appl* 2019;12:034028.