

КОДИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ МЕТОК, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОЙ ЛАЗРНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Петрова Е.А.¹, Федорова М.В.¹

Научный руководитель – канд. ф-м. наук, Зуев Д.А.¹

¹Университет ИТМО

Eleanoura@yandex.ru

Введение

Подделка товаров представляет серьёзную угрозу для современной экономики, высокотехнологичной промышленности и сферы безопасности [1]. В условиях развития микроэлектроники, гибких и носимых устройств визуально неотличимые контрафактные изделия всё чаще попадают в цепочки поставок, что может приводить не только к экономическим потерям, но и к отказам систем, снижению надёжности и рискам для пользователей [2]. В связи с этим особый интерес вызывают физически неклонируемые защитные метки, основанные на использовании случайных микроструктур, формирующихся в процессе изготовления и принципиально не поддающихся воспроизведению [3]. Такие метки рассматриваются как перспективная основа для защиты от подделок, поскольку уникальность каждого экземпляра определяется физическими процессами, а не цифровым кодированием.

Для практического применения физически неклонируемых защитных меток ключевую роль играют методы их оптической аутентификации. Это требует разработки алгоритмов, способных автоматически выявлять характерные визуальные особенности меток и выполнять их сравнение между собой. Такие протоколы должны быть устойчивы к изменениям условий съёмки, вариациям освещения и фокусировки. Анализ и сопоставление набора признаков, извлечённых из изображений меток, позволяет отказаться от прямого сравнения изображений и обеспечивает надёжную идентификацию объектов.

Основная часть

Обсуждаемые защитные метки изготавливаются методом прямой лазерной металлизации, при котором лазерное излучение локально восстанавливает ионы меди из прекурсора, формируя медные структуры на гибкой полиимидной подложке. Важной особенностью данного процесса является появление случайных микронных неровностей вдоль границ сформированных линий. Эти неоднородности носят стохастический характер и не контролируются на этапе синтеза, что делает каждую метку уникальной.

С точки зрения технического зрения, такие границы представляют собой насыщенный источник визуальных признаков: углов, изломов, локальных изменений кривизны и текстуры. Для их анализа разработан протокол аутентификации, основанный на стандартных методах извлечения ключевых точек и их сопоставления между изображениями. Вместо сравнения изображений целиком используется сопоставление наборов признаков, что обеспечивает устойчивость к повороту и сдвигу изображения.

Протокол включает этапы детектирования ключевых точек (с помощью детектора ORB), поиска соответствий и оценки геометрического преобразования между изображениями. В качестве критерия подлинности используется процент совпадения признаков. Экспериментально показано, что распределения совпадений для изображений одной и той же метки и разных меток хорошо разделены, что позволяет ввести порог аутентификации.

Особое внимание уделено анализу влияния оптического разрешения на качество распознавания. Для различных устройств считывания определены вероятности ложного принятия и ложного отказа. Показано, что увеличение оптического разрешения снижает вероятность ложной аутентификации и повышает надёжность распознавания, одновременно увеличивая требования к аппаратной части системы. Тем самым пользователь или разработчик системы аутентификации получает возможность выбрать оптимальный компромисс между затратами на оптическое оборудование и требуемым уровнем надёжности распознавания в зависимости от конкретного сценария применения. Это делает предложенный подход гибким и адаптируемым для практического внедрения в системы защиты от подделок и визуальной идентификации объектов.

Выводы

В работе продемонстрирована возможность распознавания оптических физически неклонированных защитных меток, изготовленных с помощью прямой лазерной металлизации. Показано, что случайные микроструктурные особенности, формирующиеся вдоль границ лазерно-металлизированных линий, могут эффективно использоваться в качестве устойчивых оптических признаков. Разработанный протокол распознавания, обеспечивает надёжное распознавание меток.

Литература

1. OECD, E. U. I. P. O. Illicit Trade; OECD Publishing: Paris, 2025.
2. Mura, G.; Murru, R.; Martines, G. Analysis of counterfeit electronics. *Microelectronics Reliability* 2020, 114, 113793, 31st European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis, ESREF 2020.
3. Pan, L.; Wei, Y.; Wang, J.; Ma, X. Architected Nanomaterials Powering Optical Physical Unclonable Functions. *Laser & Photonics Reviews* 2026.