

DOI: 10.18721/JPM.14308

УДК 53.07, 538.9

## ПРОЕКЦИОННЫЙ КЛАССИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР МОТТА

**В.Н. Петров<sup>1</sup>, П.Г. Габдуллин<sup>1</sup>, А.В. Павлов<sup>1</sup>,  
А.Б. Устинов<sup>1</sup>, В.Н. Строков<sup>2</sup>, Ж.Х. Дил<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Институт Пауля Шеррера,  
г. Бругг, Швейцария

В работе описывается новый спиновый детектор, разработанный, сконструированный и изготовленный в СПбПУ. Такой прибор позволяет анализировать поляризацию потока вторичных электронов, сохраняя информацию об их пространственном распределении. Представлены основные этапы создания и тестирования разработанного устройства, продемонстрированы результаты испытаний его отдельных узлов. В результате доказана принципиальная возможность реализации подобных устройств. При этом продемонстрированы как высокое пространственное разрешение данного прибора, так и его эффективность. Совмещение таких детекторов с полусферическими энергоанализаторами современных электронных спектрометров позволит получать спин-разрешенные дисперсионные зависимости исследуемой структуры.

**Ключевые слова:** детектор Мотта, спин, электронная спектроскопия, поляризация вторичных электронов

**Ссылка при цитировании:** Петров В.Н., Габдуллин П.Г., Павлов А.В., Устинов А.Б., Строков В.Н., Дил Ж.Х. Проекционный классический детектор Мотта // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 3. С. 112–121. DOI: 10.18721/JPM.14308

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## PROJECTING CLASSICAL MOTT POLARIMETER

**V.N. Petrov<sup>1</sup>, P.G. Gabdullin<sup>1</sup>, A.V. Pavlov<sup>1</sup>,  
A.B. Ustinov<sup>1</sup>, V.N. Strocov<sup>2</sup>, J.H. Dil<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> Paul Scherrer Institute,  
Brugg, Switzerland

In this paper we describe a new spin detector designed and manufactured at SPbPU. This device makes it possible to analyze the polarization of the secondary electron flux conserving the information about the electrons' spatial distribution. The main stages of development, construction and testing the detector are discussed in details. As a result, the possibility of implementing such devices has been proved in principle. At the same time, both high spatial resolution of this device and its efficiency were demonstrated. Combining such detectors with hemispherical energy analyzers will make it possible to obtain spin-resolved dispersion images of the structure under study.

**Keywords:** Mott detector, spin, electron spectroscopy, secondary electron polarization

**Citation:** Petrov V.N., Gabdullin P.G., Pavlov A.V., Ustinov A.B., Strocov V.N., Dil J.H., Projecting classical Mott polarimeter, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (3) (2021) 112–121. DOI: 10.18721/JPM.14308



This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

Как известно, для описания многих физических процессов и явлений важна конфигурация спиновой структуры некоторого ансамбля частиц. Для характеристики экспериментально измеряемой спиновой структуры используется физическая величина, известная как поляризация  $P$ . Поляризация относительно определенной оси квантования следует выражению

$$P = (N^\uparrow - N^\downarrow)/(N^\uparrow + N^\downarrow),$$

где  $N^\uparrow, N^\downarrow$  – количества электронов в ансамбле, у которых проекция спина на ось квантования может принимать значения  $+\hbar/2$  и  $-\hbar/2$ , соответственно.

Спиновая степень свободы электрона также является основой для описания множества физических явлений. Результаты спиновых измерений сыграли важную роль в понимании таких эффектов, как гигантское магнетосопротивление [1], формирование магнитных доменов [2, 3], эффект Рашбы [4], появление топологически защищенных состояний в твердом теле [5].

Прямое детектирование поляризации потока частиц возможно, например, с помощью классического детектора Мотта [6, 7]. В таком приборе электроны ускоряются до энергий порядка 40 – 100 кэВ, после чего они рассеиваются на золотой фольге. На золотой фольге возникает спин-зависимое рассеивание электронов, которое достигается ввиду значительного спин-орбитального взаимодействия, при этом электроны с проекцией спина, направленной вдоль оси квантования, имеют более высокую вероятность рассеяться в один из детекторов, а имеющие противоположную проекцию спина – в другой.

В результате описанных воздействий возникает фиксируемая экспериментально асимметрия рассеяния электронов  $A$ , которая выражается как

$$A = (N_1 - N_2)/(N_1 + N_2),$$

где  $N_1, N_2$  – количества электронов, поступивших в первый и второй детекторы соответственно.

Ввиду линейности по спину потенциала спин-орбитального взаимодействия, принято считать, что асимметрия пропорциональна величине поляризации, т. е.  $A \sim P$ , что позволяет вычислять значение поляризации, если известен коэффициент пропорциональности, который характеризует измерительную систему:  $P = A/S$ , где  $S$  – функция Шермана.

Важным современным экспериментальным методом является фотоэлектронная спектроскопия с разрешением по углу (ФЭСУР, *англ.* Angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES) [8]. Ее использование позволяет получать спектры вторичных электронов с разрешением не только по энергии, но и по углу, под которым эти электроны эмитируются из твердого тела [8]. Поскольку указанный угол связан с величиной импульса электрона в твердом теле, ФЭСУР можно применять для прямого измерения дисперсионных зависимостей электронов  $E(\mathbf{k})$  изучаемой структуры ( $E$  – энергия электронов,  $\mathbf{k}$  – волновой вектор).

Имеющиеся приборы чаще всего работают следующим образом: вторичные электроны, покидающие образец, направляются в энергоанализатор, где разделяются по энергии и по углу. Затем поток электронов усиливается посредством микроканальной пластины. После микроканальной пластины электроны попадают на люминесцентный экран, где осуществ-

вляется их преобразование в излучение видимого диапазона; последнее фиксируется регистрирующей камерой, находящейся вне вакуумной камеры.

Такие энергоанализаторы делают возможным одновременное определение количества частиц, их импульсов и энергий в широком диапазоне, что значительно сокращает время необходимого накопления данных. Использование полусферического энергоанализатора, применяемого в ФЭСУР, в сочетании с детектором Мотта позволяет экспериментально измерять дисперсионные зависимости с разрешением по спину и углу (ФЭССУР, *англ.* Spin-and angle- resolved photoemission spectroscopy, SARPES) [9]. Указанный комплексный метод служит незаменимым инструментом при исследовании новых материалов.

Серьезным недостатком имеющихся SARPES-приборов является одноканальный режим работы имеющихся детекторов Мотта, а значит, регистрация только части потока вторичных электронов в каждый момент времени, с энергией и проекцией импульса в узком диапазоне; при этом нивелируются все возможности, которые могло бы давать использование пространственно-чувствительных детекторов. Указанный недостаток существенно снижает эффективность проводимых экспериментов.

Одно из возможных решений этой проблемы заключается в создании детектора Мотта, у которого возможности спинового анализа должны сочетаться с пространственной чувствительностью детекторов электронов. Впервые идея подобного прибора была представлена в работе [10].

В данной работе описан процесс создания и испытания подобного многоканального детектора поляризации на основе классического детектора Мотта.

### Проектирование и разработка

В качестве основы для разработки многоканального детектора поляризации был взят классический детектор Мотта, в который были внесены изменения, необходимые для обеспечения пространственного разрешения.

На рис. 1 представлен упрощенный чертеж детектора Мотта. Проектирование велось таким образом, чтобы предусмотреть монтаж прибора сразу за выходной апертурой полусферического энергоанализатора SPECS PNOIBOS-150.

Работа прибора осуществляется следующим образом. Пройдя через энергоанализатор, электроны попадают во входную апертуру 1 детектора Мотта. Внутри детектора поток электронов сначала проходит через четырехсекционную электростатическую линзу 2, которая фокусирует поток электронов. Сфокусированный электронный поток ускоряется потенциалом 40 кВ и попадает в дрейфовое пространство детектора Мотта 3. Затем этот поток может попасть либо на ПЗС-матрицу, либо на золотую фольгу 5 (выбор осуществляется поворотом вакуумного манипулятора).

Первый режим (в центре детектора расположена ПЗС-матрица) необходим для настройки входной электронной оптики детектора. В этом случае фиксируется изображение, полученное на выходе энергоанализатора и сфокусированное электронной оптикой детектора Мотта (рис. 2). Во втором режиме электроны рассеиваются на золотой фольге. При этом электроны, в зависимости от ориентации спина, имеют высокую вероятность рассеяться и попасть в один из четырех детекторов – по два детектора на каждую проекцию спина. В итоге устройство обеспечивает анализ поляризации потока электронов.

После рассеяния на золотой фольге электроны попадают в детектор, состоящий из магнитной фокусирующей линзы (поз. 5 на рис. 1) и ПЗС-матрицы 6, предназначенной для детектирования высокоэнергичных электронов. Магнитная линза предназначена для фокусирования рассеявшихся электронов, а матрица служит детектором, который измеряет не только факт прибытия частицы, но и позицию пикселя, зафиксировавшего частицу. В качестве

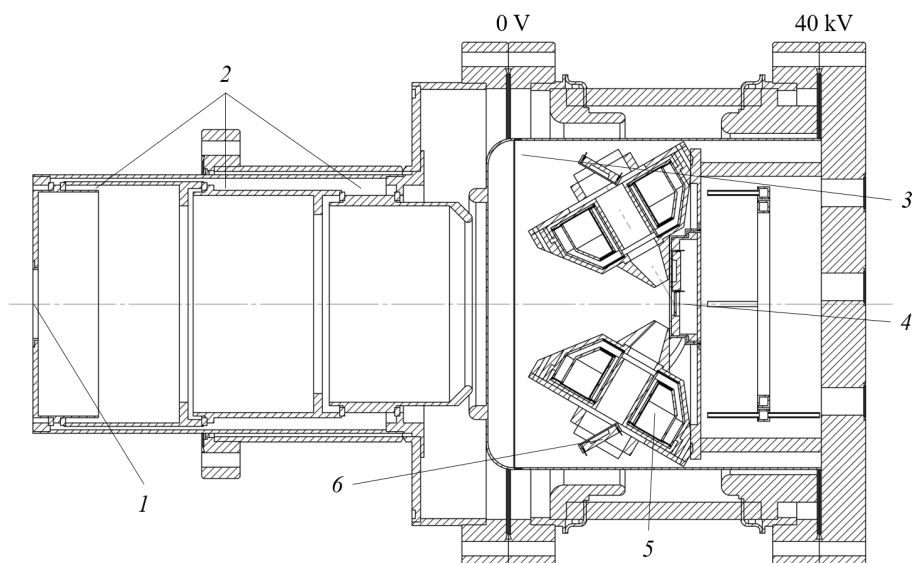


Рис. 1. Чертеж многоканального детектора Мотта:

1 – входная апертура, 2 – фокусирующая электростатическая линза, 3 – электростатический экран, 4 – золотая фольга или магнитная линза, 5 – магнитная линза, 6 – ПЗС-матрица. Надписи "0 V" и "40 kV" показывают значения потенциалов, приложенных к соответствующим частям прибора

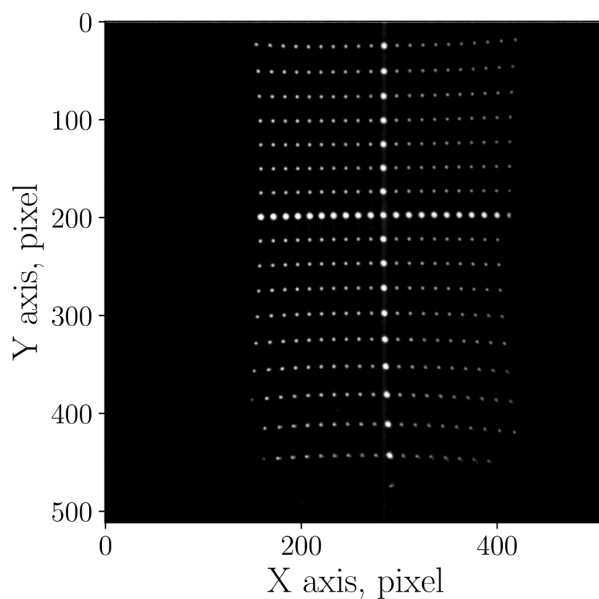


Рис. 2. Изображения апертуры, расположенной внутри энергоанализатора, полученные на ПЗС-матрице в центре детектора Мотта.

Интенсивность в каждой точке пропорциональна количеству электронов, попавших в данный пиксель матрицы. Изображения вычтен фон, соответствующий темному току матрицы и засветке от неупругих электронов

детектора было решено выбрать матрицы Hamamatsu S7170 (Япония), на которых отсутствие защитного слоя и ультрафиолетового фильтра позволяют эффективно детектировать высокоэнергичные заряженные частицы. Таким образом, прибор регистрировал факты соударения электронов высокой энергии с ПЗС-матрицей. Рис. 2 и 3 демонстрируют изображения

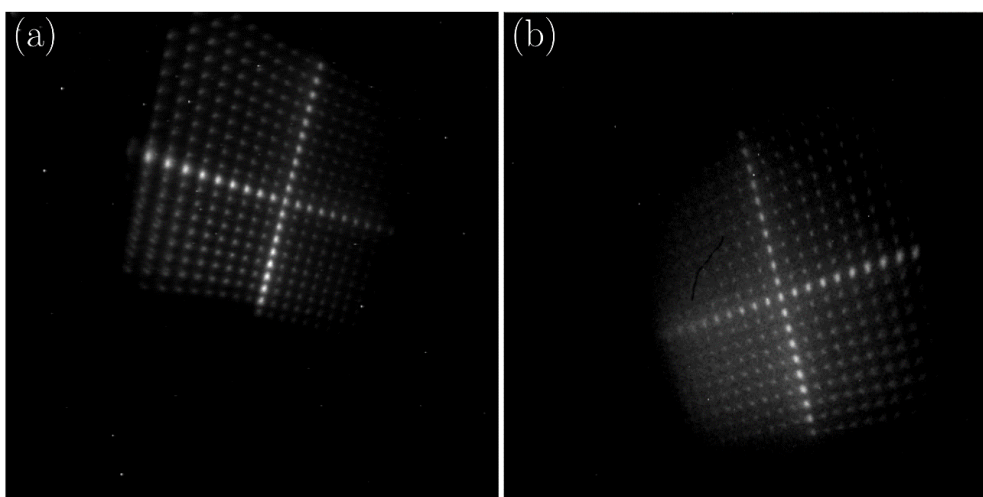


Рис. 3. Изображения апертуры, расположенной там же (см. рис. 2), но полученные на первой (а) и второй (б) ПЗС-матрицах после магнитных линз (см. также пояснения к рис. 2)

апертуры, расположенной внутри энергоанализатора, полученные на ПЗС-матрице в режиме счета вторичных электронов. Размер каждого пикселя (пк) такой матрицы составляет  $24 \times 24$  мкм, ее разрешение –  $512 \times 512$  пк.

Таким образом, описанный прибор обеспечивает не только спиновый анализ потока электронов, но и детектирование их распределения в пространстве. С его помощью можно измерять, например, спин-разрешенные дисперсионные соотношения  $E(\mathbf{k})$  у исследуемых образцов.

### Испытания и калибровка детектора Мотта

Создание прибора – это многоплановый процесс, включающий в себя несколько стадий и таких процедур, как создание чертежей прибора, изготовление его составных частей, их сварки, сборки и проверки на вакуумную герметичность. После такой проверки проводится ряд тестов на электрическую прочность изоляторов, входящих в состав детектора.

При правильном функционировании прибора, поток электронов на его входе должен без искажений попадать на золотую фольгу, а поток отразившихся от фольги электронов должен быть собран и сфокусирован на ПЗС-матрицу. Поскольку каждая точка сечения электронного потока несет информацию о физических свойствах исследуемого образца, требуется достигнуть минимального уровня искажений.

Для настройки электростатической и магнитной оптики внутри энергоанализатора была помещена пластина с рисунком, составленным из отверстий диаметрами 0,50 и 0,25 мм. После прохождения электронов через энергоанализатор они распределялись в пространстве в соответствии с их энергией и углом выхода. Проходя через апертуру, такой поток электронов преобразовывался в изображение массива точек, электроны в которых имели близкие энергии и углы эмиссии.

Для тестирования электростатической линзы, в центр детектора Мотта (на место золотой фольги) была установлена ПЗС-матрица. Пример изображения электронного потока, полученного на этой матрице, показан на рис. 2. Здесь ось  $X$  параллельна направлению, вдоль которого изменялась энергия электронов, прошедших через энергоанализатор, а ось  $Y$  – направлению, вдоль которого измерялся угол эмиссии электронов в потоке. Четкое изображение апертуры на ПЗС-матрице соответствует оптимальной фокусировке электростатической

линзы. Настройка электронной оптики и изменение ускоряющего напряжения позволяло выбрать подходящий для эксперимента коэффициент усиления линзы.

После получения четкого изображения на ПЗС-матрице, расположенной в центре детектора Мотта, значения напряжения на электродах электростатической линзы были зафиксированы, и вместо ПЗС-матрицы в центр детектора была установлена золотая фольга.

Настройка магнитных линз проводилась путем варьирования значения тока, который протекает через катушку. Этот ток создает магнитное поле, в котором траектории электронов закручиваются вокруг оси линзы, что обеспечивает нужную фокусировку, однако с неизбежностью приводит к некоторым искажениям.

Рис. 3 демонстрирует изображения апертуры на ПЗС-матрицах, расположенных за магнитной линзой. При одинаковом направлении тока в катушке магнитной линзы изображения на левой и правой матрицах детектора Мотта должны быть повернуты в разные стороны. Небольшое размытие изображения связано с абберациями, возникающими в сложной электронно-оптической системе, и могут быть в дальнейшем нивелированы путем более тонкой настройки системы и обработки изображения.

Последним испытанием данной системы являлось измерение асимметрии рассеяния электронов, идущих в детекторе Мотта от намагниченного образца. Для решения этой задачи было решено использовать аморфный образец борида железа FeB. Данное вещество, будучи магнитомягким материалом с прямоугольной петлей гистерезиса, обладает стабильным поверхностным магнетизмом, что делает его удобным для испытаний. В ходе эксперимента образец облучали потоком первичных электронов, а поток вторичных электронов направлялся через энергоанализатор в детектор Мотта, где осуществлялась их дисперсия по энергии с помощью полусферического зеркала; затем поток электронов попадал в детектор Мотта, где и происходил спиновый анализ.

Рис. 4 демонстрирует полученные зависимости асимметрии от энергии вторичных электронов, идущих от образца, для двух диапазонов энергии: 8,5 – 11,5 и 37 – 43 эВ (центральные значения энергии – 10 и 40 эВ соответственно). Как было отмечено выше, при прохождении

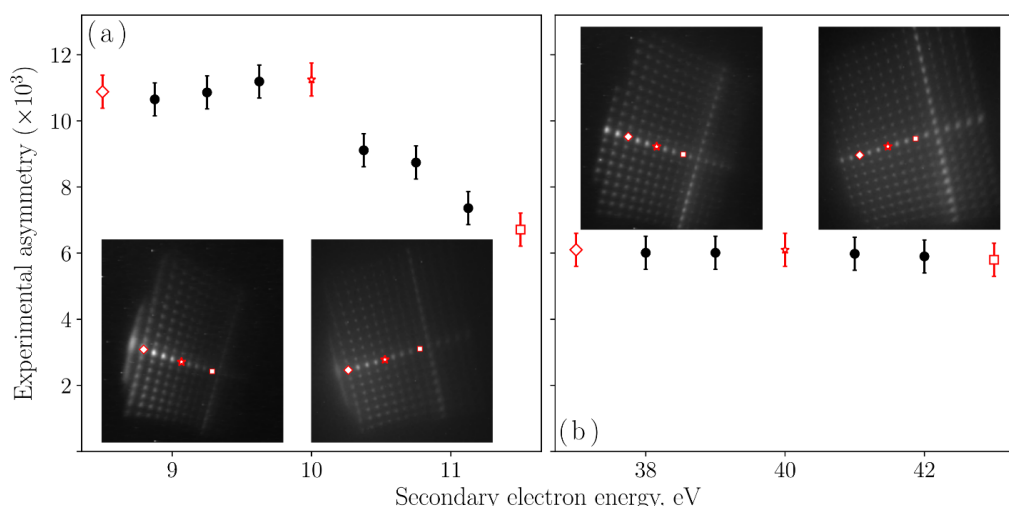


Рис. 4. Зависимости асимметрии потока электронов от энергии низкоэнергетических (a) и высокоэнергетических (b) вторичных электронов, идущих от образца, намагниченного боридом железа (измерения проведены с помощью детектора Мотта).

На вставках даны изображения с двух ПЗС-матриц (см. рис. 3), где ромбами, звездами и прямоугольниками помечены точки, сигнал с которых использовался для расчета асимметрии (они отмечены теми же символами на графиках)



дении через энергоанализатор с апертурой, поток электронов преобразуется в массив точек. При этом электроны внутри каждой точки имеют близкие значения энергии и угла выхода. Этот факт можно использовать для определения зависимости асимметрии потока электронов от энергии. Незатушеванными символами на рис. 4 показаны точки, уровень сигнала которых (см. изображения на вставке) использовался для расчета асимметрии. Анализ данных рис. 4 позволяет заключить, что низкоэнергетические электроны обладают более высокой поляризацией, по сравнению с более высокоэнергетичными, что хорошо согласуется с литературными данными [11, 12].

Дальнейшие эксперименты позволят определить значение функции Шермана  $S$  для данного детектора Мотта. После окончательной настройки всех частей системы станет возможным прямое измерение спин-разрешенных дисперсионных зависимостей для вторичных электронов.

### Заключение

В данной работе описан процесс создания и испытания нового проекционного классического детектора Мотта. Продемонстрированы результаты испытаний отдельных узлов устройства на различных этапах его создания.

Хотя созданное устройство требует финальной наладки и ввода в эксплуатацию, уже получен главный результат: доказана принципиальная возможность реализации подобных устройств. При этом продемонстрированы как высокое пространственное разрешение данного прибора, так и его эффективность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., et al.** Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr magnetic superlattices // *Physical Review Letters*. 1988. Vol. 61. No. 21. P. 2472.
2. **Kirschner J., Rebenstorff D., Ibach H.** High-resolution spin-polarized electron-energy-loss spectroscopy and the stoner excitation spectrum in nickel // *Physical Review Letters*. 1984. Vol. 53. No. 7. P. 698.
3. **Väterlaus A., Stamm C., Maier U., Pini M.G., Politi P., Pescia D.** Two-step disordering of perpendicularly magnetized ultrathin films // *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 84. No. 10. P. 2247.
4. **Hoesch M., Muntwiler M., Petrov V.N., Hengsberger M., Patthey L., Shi M., Falub M., Greber T., Osterwalder J.** Spin structure of the Shockley surface state on Au (111) // *Physical Review B*. 2004. Vol. 69. No. 24. P. 241401.
5. **Hasan M.Z., Kane Ch.L.** Colloquium: topological insulators // *Reviews of Modern Physics*. 2010. Vol. 82. No. 4. P. 3045.
6. **Petrov V.N., Galaktionov M.S., Kamochkin A.S.** Comparative tests of conventional and retard-ing-potential Mott polarimeters // *Review of Scientific Instruments*. 2001. Vol. 72. No. 9. Pp. 3728–3730.
7. **Petrov V.N., Grebenshikov V.V., Grachev B.D., Kamochkin A.S.** New compact classical 40 kV Mott polarimeter // *Review of Scientific Instruments*. 2003. Vol. 74. No. 3. Pp. 1278–1281.
8. **Шикин А.М.** Взаимодействие фотонов и электронов с твердым телом. СПб.: Издательство ВВМ, 2008. 11 с.
9. **Hoesch M., Greber T., Petrov V.N., Muntwiler M., Hengsberger M., Auwarter W., Osterwalder J.** Spin-polarized Fermi surface mapping // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2002. Vol. 124. No. 2–3. Pp. 263–279.
10. **Strocov V.N., Petrov V.N., Dil J.H.** Concept of a multichannel spin-resolving electron analyzer based on Mott scattering // *Journal of Synchrotron Radiation*. 2015. Vol. 22. Part 3. May. Pp. 708–716.



11. **Penn D.R., Apell S.P., Girvin S.M.** Theory of spin-polarized secondary electrons in transition metals // Physical Review Letters. 1985. Vol. 55. No. 5. P. 518.

12. **Oepen H.P., Frömter R.** Scanning electron microscopy with polarization analysis // Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials (Eds. H. Kronmüller, S. Parkin, R. Wiesendanger, G. Guntherodt). Wiley Online Library, 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470022184.hmm309>

*Статья поступила в редакцию 28.06.2021, принята к публикации 05.07.2021.*

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПЕТРОВ Владимир Никифорович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
petrov@physics.spbstu.ru

**ГАБДУЛЛИН Павел Гарифович** – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
gabdullin\_pg@spbstu.ru

**ПАВЛОВ Александр Валерьевич** – преподаватель кафедры общей физики Санкт-Петербургского национального исследовательского академического университета имени Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3  
a.pavlov@physics.spbstu.ru

**УСТИНОВ Александр Борисович** – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
ustinov@physics.spbstu.ru

**СТРОКОВ Владимир Николаевич** – доктор физико-математических наук, научный сотрудник Института Пауля Шеррера, г. Бругг, Швейцария.

5232, 111, Forschungsstrasse, Villigen PSI, Switzerland  
vladimir.strocov@psi.ch

**ДИЛ Жан Хьюго** – PhD, глава научной группы COPHEE Института Пауля Шеррера, г. Бругг, Швейцария.

5232, 111, Forschungsstrasse, Villigen PSI, Switzerland  
jan-hugo.dil@psi.ch



## REFERENCES

1. **Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., et al.**, Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr magnetic superlattices, *Phys. Rev. Lett.* 61 (21) (1988) 2472.
2. **Kirschner J., Rebenstorff D., Ibach H.**, High-resolution spin-polarized electron-energy-loss spectroscopy and the stoner excitation spectrum in nickel, *Phys. Rev. Lett.* 53 (21) (1988) 698.
3. **Vaterlaus A., Stamm C., Maier U., et al.**, Two-step disordering of perpendicularly magnetized ultrathin films, *Phys. Rev. Lett.* 84 (10) (2000) 2247.
4. **Hoesch M., Muntwiler M., Petrov V.N., et al.**, Spin structure of the Shockley surface state on Au (111), *Phys. Rev. B.* 69 (24) (2004) 241401.
5. **Hasan M.Z., Kane Ch.L.**, Colloquium: topological insulators // *Rev. Mod. Phys.* 82 (4) (2010) 3045.
6. **Petrov V.N., Galaktionov M.S., Kamochkin A.S.**, Comparative tests of conventional and retarding-potential Mott polarimeters, *Rev. Sci. Instr.* 72 (9) (2001) 3728–3730.
7. **Petrov V.N., Grebenshikov V.V., Grachev B.D., Kamochkin A.S.**, New compact classical 40 kV Mott polarimeter, *Rev. Sci. Instr.* 74 (3) (2003) 1278–1281.
8. **Shikin A.M.**, *Vzaimodeystviye fotonov i elektronov s tverdyim telom* [Interaction of photons and electrons with solids], BBM Publishing, St. Petersburg, 2008 (in Russian).
9. **Hoesch M., Greber T., Petrov V.N., et al.**, Spin-polarized Fermi surface mapping, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 124 (2–3) (2002) 263–279.
10. **Strocov V.N., Petrov V.N., Dil J.H.**, Concept of a multichannel spin-resolving electron analyzer based on Mott scattering, *J. Synchrotron Rad.* 22-3 (May) (2015) 708–716.
11. **Penn D.R., Apell S.P., Girvin S.M.**, Theory of spin-polarized secondary electrons in transition metals, *Phys. Rev. Lett.* 55 (5) (1985) 518.
12. **Oepen H.P., Frömter R.**, Scanning electron microscopy with polarisation analysis, *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials* (Eds. H. Kronmüller, S. Parkin, R. Wiesendanger, G. Guntherodt). Wiley Online Library, 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470022184.hmm309>

*Received 28.06.2021, accepted 05.07.2021.*

## THE AUTHORS

### **PETROV Vladimir N.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
petrov@physics.spbstu.ru

### **GABDULLIN Pavel G.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
gabdullin\_pg@spbstu.ru

### **PAVLOV Alexander V.**

*Alferov University of RAS*

8-3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation  
a.pavlov@physics.spbstu.ru

**USTINOV Alexander B.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

ustinov@physics.spbstu.ru

**STROCOV Vladimir N.**

*Paul Scherrer Institute*

111, Forschungsstrasse, Villigen PSI, 5232, Switzerland

vladimir.strokov@psi.ch

**DIL Jan Hugo**

*Paul Scherrer Institute*

111, Forschungsstrasse, Villigen PSI, 5232, Switzerland

jan-hugo.dil@psi.ch