

Квантовый эффект Холла и постоянная Клитцинга

Сергей Георгиевич Семенчинский

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, semench-vm@vniims.ru

Аннотация. Рассмотрена актуальная проблема в области электрических измерений в связи с принятыми 26-й Генеральной конференцией по мерам и весам в ноябре 2018 г. (Франция, Версаль) новыми определениями единиц физических величин системы СИ, а именно воспроизведение ома на основе квантового эффекта Холла. Объяснены причины введения в 1988 г. независимой от международной системы единиц константы Клитцинга и её отмены в 2018 г. Изложены физические основы эффекта. Проанализированы основные косвенные и прямые эксперименты, приведшие к созданию эталона ома на основе квантового эффекта Холла, в том числе проведённые во ВНИИМС в 1982–1986 гг. На примере этих экспериментов показана идентичность значений квантованного сопротивления для образцов, изготовленных на основе инверсионных слоёв в кремнии, арсениде галлия и в образцах принципиально нового вещества графена. Приведены результаты по использованию графена для создания эталонов на основе квантового эффекта Холла для различных отраслей промышленности и науки на базе новейших достижений в его изготовлении.

Ключевые слова: квантовый эффект Холла, заряд электрона, постоянная Планка, постоянная Клитцинга, графен

Для цитирования: Семенчинский С. Г. Квантовый эффект Холла и постоянная Клитцинга // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 9–13. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-9-13>

Quantum Hall effect and von Klitzing constant

Sergey G. Semenchinskiy

Russian Research Institute for Metrological Service, Moscow, Russia, semench-vm@vniims.ru

Abstract. The current problem in the field of electrical measurements is considered in connection with the new definitions of SI units of physical quantities adopted by the 26th General Conference on Weights and Measures in November 2018 (France, Versailles), namely, the reproduction of an ohm based on the quantum Hall effect. The reasons for the introduction in 1988 of the Klitzing constant independent of the international system of units and its cancellation in 2018 are explained. The physical foundations of the quantum Hall effect are outlined. The main indirect and direct experiments that led to the creation of an ohm standard based on the quantum Hall effect, including those carried out at VNIIMS in 1982–1986, are analyzed. Using the example of these experiments, the identity of the values of the quantized resistance for samples prepared on the basis of inversion layers in silicon, gallium arsenide and in samples of a fundamentally new substance graphene is shown. Results on the use of graphene to create standards based on the quantum Hall effect for various industries and science based on the latest advances in its production are presented.

Keywords: Quantum Hall effect, electron charge, Planck's constant, Klitzing's constant, graphene

В 1980 г. К. фон Клитцинг открыл квантовый эффект Холла (КЭХ). За прошедшие 38 лет в исследования КЭХ был пройден путь от первого наблюдения эффекта до утверждения новой версии Международной системы единиц (СИ), что стало возможным благодаря открытию КЭХ.

16 ноября 2018 г. на историческом заседании Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) лауреат Нобелевской премии, директор немецкого института Макса Планка Клаус фон Клитцинг в конце своей презентации [1] заявил, что «рад тому, что принята новая версия Международной системы единиц (СИ), основанная на фундаментальных физических константах, но ему грустно, что константа, названная в его честь [2], умерла». Что скрывалось за этими словами?

Открытие Клаусом фон Клитцингом КЭХ в 1980 г. [3] ознаменовало новую эпоху в электрических измерениях. Измерения электрического сопротивления обрели естественный репер подобно реперу электрического напряжения на эффекте Джозефсона. В распоряжении национальных метрологических институтов появилась возможность построения стабильной системы электрических измерений, в основе которой лежали два упомянутых эффекта. К 1988 г. с помощью измерений свойств образцов от разных производителей в различных лабораториях была установлена воспроизводимость квантованных значений холловского сопротивления на образцах на основе GaAs в пределах относительной неопределённости измерений в несколько

единиц девятого знака. В пределах этой неопределённости результаты измерений на образцах гетероструктур в независимых лабораториях совпадали.

В 1988 г. Международный комитет мер и весов (МКМВ) рекомендовал всем национальным метрологическим институтам воспроизводить ом на основании КЭХ, используя для воспроизводимого значения сопротивления кратные доли принятого за точное значение $R_K = 25812,807$ Ом, которое и получило название константы Клитцинга. Одновременно была введена постоянная Джозефсона K_J , которой также предписывалось точное значение для определения вольта. Значения этих постоянных были определены на основе имеющихся в то время сведений и имели погрешность в несколько единиц седьмого знака после запятой, однако стабильность их воспроизведения была на два порядка выше. Об истории, предшествующей этому, см., например, [4].

Введение новых постоянных, которые должны были лечь в основу электрических измерений, означало, что фактически эти измерения выводились из системы СИ, так как были основаны на независимых от СИ определениях. Но одновременно с этим МКМВ призвал мировое научное сообщество работать над прямыми доказательствами универсальности новых констант и уточнения их значений в системе СИ.

К 1988 г. КЭХ наблюдался во многих инверсионных слоях в полупроводниках, однако необходимая для метрологических применений высокая точность измерений в то время достигалась лишь на образцах инверсионных слоёв в структурах на основе GaAs/AlGaAs. Напомним, что инверсионным слоем в полупроводниках называют слой у границы полупроводника, в котором знак носителей заряда противоположен знаку основных носителей в объёме полупроводника. При низкой температуре его можно рассматривать, как тонкую плёнку металла, окружённую изолятором.

Физические основы КЭХ. Для дальнейшего понимания кратко рассмотрим физическую природу КЭХ. В двумерных электронных слоях при низких температурах напряжение Холла перестаёт линейно зависеть от магнитного поля. Вместо этого на зависимости напряжения от тока вблизи точек квантования образуются плато. Уже в первой работе, посвящённой открытию КЭХ [3] К. фон Клитцинг предположил, что значения холловского сопротивления, т. е. отношения холловского напряжения к току на этих плато, равны кратным частям комбинации фундаментальных констант – постоянной Планка h и заряда электрона e :

$$R_H = h/e^2.$$

Это является следствием квантования Ландау (образования дискретных уровней энергии электронов в магнитном поле). Если рассмотреть простую двумерную систему из невзаимодействующих электронов, помещённую в перпендикулярное рассматриваемой плоскости магнитное поле с индукцией B , то движение электронов в плоскости будет квантованным. Возникнут разрешённые уровни энергии для электронов, любые прочие энергии будут недоступны.

Каждый такой уровень имеет ограниченное и точно известное количество мест для электронов на единицу площади:

$$\eta = eB/h.$$

Обозначим число заполнения уровней через $\nu = n/\eta$, где n – число носителей на единицу площади. Заполнение уровней Ландау изменяется по мере изменения магнитной индукции или количества электронов в двумерном слое. При этом особыми точками являются моменты, когда n кратно η , т. е. $\nu = N$, где N – целое. В эти моменты возникает запрещённая энергетическая зона между последним заполненным уровнем и полностью свободным. Ширина этой зоны равна расстоянию между уровнями Ландау. При температуре ниже некоторого уровня электрон не имеет достаточной энергии, чтобы перейти и занять место на свободном уровне энергии, а значит, диссипация энергии в системе невозможна.

Запишем холловское сопротивление слоя при $\nu = N$:

$$R_H = U_H/I = h/(Ne^2), \quad (1)$$

где U_H – холловское напряжение; I – ток.

Заметим, что в (1) присутствуют только фундаментальные константы h , e и нет никаких параметров среды, т. е. параметров полупроводника, в котором этот слой образован. Лишь остаточная вероятность перехода электрона на незаселённый уровень может нарушить это равенство.

Остаётся понять, откуда берутся плато. Все рассуждения выше касаются только идеального двумерного слоя, в котором энергия электрона на уровне Ландау одинакова для всех его точек. Однако в реальных двумерных слоях всегда есть примеси, нарушения кристаллического порядка и другие неидеальности. В результате энергии электронов, принадлежащих одному уровню Ландау в разных пространственных точках слоя оказываются неодинаковыми [5]. При заполнении уровня электроны сначала заполняют все «ямы», где энергии минимальны. Но эти ямы не связаны друг с другом, там электроны локализованы и не могут участвовать в переносе тока. Точно так же локализованными оказываются электроны на вершинах «холмов» – участков с энергиями выше средней по образцу. Ток переносится только электронами с энергиями, близкими средним. Это и объясняет экспериментально наблюдаемые плато холловского сопротивления. Плато начинается после заполнения нелокализованных уровней энергии на одном уровне Ландау, продолжается по мере заполнения «холмов» этого уровня и «ям» следующего и заканчивается, когда на следующем уровне начинается заполнение очередных нелокализованных состояний. При этом лишь диссипация энергии нелокализованных электронов путём рассеяния на незаполненные ещё состояния (или локализованного электрона в ближайшее незаполненное нелокализованное) влияет на холловское сопротивление R_H . Оно же создаёт и сопротивление R_x текущему в образце току.

Косвенные эксперименты. Связь между продольным и холловским сопротивлением образцов в режиме КЭХ

является фундаментальным свойством эффекта. Впервые эта связь исследована в Si-МОП-структурах в работе [6]. Авторами была обнаружена линейная зависимость между $\Delta_H = R_H - h/(Ne^2)$ и R_x в широком диапазоне температур и факторов заполнения.

Исследование ёмкости образца, проведённое позже этими же авторами, показало, что вблизи середины плато на зависимости ёмкости от фактора заполнения образуются аномалии, вызванные возникновением вихревых токов в образце, причём время затухания этих токов чрезвычайно велико. При температуре 0,3 К время затухания было оценено в 10^9 с [7, 8]. Если результаты работы [6] экстраполировать в область столь малой диссипации, то получим, что относительное отличие сопротивления R_H от $h/(Ne^2)$ в данном случае менее чем 10^{-15} . Аналогичный результат получен и в работе [9]. В этом случае с помощью торсионного магнитометра измерялось магнитное поле вихревых токов в гетеропереходе на основе GaAs в форме диска Корбино.

Из результатов этих экспериментов следовало, что КЭХ является макроскопическим квантовым эффектом, в котором рассеяние энергии носителей заряда ничтожно, и отличие R_H от $h/(Ne^2)$ может быть очень малым. Но это были косвенные эксперименты. Метрологам же требовалось прямое доказательство универсальности эффекта, и это имело свои основания. Ведь измерение холловского напряжения предполагает наличие измерительной цепи, включающей в себя, как минимум, контакты с образцом, которые могли бы исказить результат.

Прямые измерения. Первым прямым доказательством стали опубликованные в 1991 г. результаты сравнения значений холловского сопротивления, воспроизводимого одновременно на двух существенно разных образцах. Первый образец являлся МОП-структурой на основе кремния, а второй был выполнен на основе гетероперехода AsGa-AlAsGa (Hartland et al., [10]). Почему это было сделано так поздно, ведь именно в кремниевой МОП-структуре Клитцинг и открыл КЭХ? Дело в том, что в кремнии КЭХ точно измерять труднее, чем в арсениде галлия. Там эффект существует в более жёстких условиях, при более низких температурах и малых токах. Экспериментальная база для измерений с необходимой точностью появилась лишь в конце 1980-х гг. В работе [10] было измерено отношение холловских сопротивлений на плато $\nu=2$ образца GaAs/AlGaAs и на плато $\nu=4$ образца кремниевой МОП-структуры. В результате было установлено

$$R_{H(\nu=2; \text{GaAs})}/R_{H(\nu=4; \text{Si})} = 2(1 - 0,22 \cdot 10^{-10})$$

с относительной неопределённостью $3,5 \cdot 10^{-10}$.

Позже этот результат был улучшен в работах [11, 12] (Jeskelmann et al), где было установлено равенство $R_{H(\text{GaAs})}$ и $R_{H(\text{Si})}$ с относительной неопределённостью $2,3 \cdot 10^{-10}$.

КЭХ в графене. В 2004 г. произошло событие, открывшее новую страницу в физике двумерных систем, и, в частности, в исследованиях КЭХ. Впервые был изготовлен и исследован графен – одноатомный слой из атомов углерода,

упорядоченных в кристаллическую решётку. Первая статья с результатами исследований группы Гейма А. К. и Новосёлова К. С. [13] вышла даже немного раньше, чем их же знаменитая статья в Science об открытии графена [14]. Графен – истинный двумерный кристалл, представляющий собой отдельный слой атомов углерода, плотно упакованных в сотовую кристаллическую решётку, и этим отличающийся от инверсионных слоёв в полупроводниках. Он не является ни полупроводником, ни металлом в полном смысле этого слова. При отсутствии внешнего влияния его валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости пуста, однако запрещённой зоны энергии у графена нет – зона проводимости и валентная зона имеют одну общую точку, так называемую точку Дирака. Для исследований КЭХ графен интересен тем, что в нём уровни Ландау не эквидистантны по энергии. При этом расстояние между первыми из них в магнитном поле 10 Тл в 5 раз превышает расстояние между уровнями Ландау в двумерных слоях гетероструктур на основе GaAs, и в 20 раз – расстояние между уровнями Ландау в Si-МОП структурах. Это делает возможным существование КЭХ в графене при значительно более высоких температурах и (или) существенно меньших магнитных полях, чем в инверсионных слоях. В 2007 г. ими же были опубликованы наблюдения КЭХ в графене, в том числе и при комнатной температуре [15].

Первая попытка точного измерения разницы в значениях R_H в режиме квантования для образца графена и инверсионного слоя в арсениде галлия была сделана в работе [16]. Авторы сравнивали значения, полученные на образце графена, с сопротивлением опорного резистора 100 Ом, точное значение которого измерялось по КЭХ в обычном AsGa/AlAsGa-образце. Было продемонстрировано совпадение значений, но неопределённость результатов измерений оказалась невелика – примерно 15 ppm. Причины – малые размеры образца, ширина которого составляла всего 1 мкм, и высокое сопротивление контактов. Из-за этого ток в образце не удавалось сделать более 1,5 мкА, что на два порядка меньше обычного тока для структур на GaAs.

В 2009 г. сразу несколькими группам удалось вырастить образцы графена большой площади. Работа [17] оказалась первой из них, и её результатом стало доказательство равенства значений R_H для графена и структуры GaAs/AlGaAs с неопределённостью $3 \cdot 10^{-9}$. Позже в работе [18] неопределённость была уменьшена до $8,7 \cdot 10^{-11}$, что уже было на грани современных экспериментальных возможностей. Наконец, группа из национальной метрологической лаборатории Франции продемонстрировала, что образцы, изготовленные из графена, превосходят традиционные структуры GaAs/AlGaAs по метрологическим возможностям [19]. Опыт авторов [19] доказывает, что экспериментальные условия, необходимые для воспроизведения КЭХ устройствами, изготовленными из высококачественного графена, выращенного методом химического осаждения из газовой фазы на карбид кремния, оказываются значительно мягче по сравнению с условиями для современных устройств GaAs/AlGaAs. В частности, сопротивление Холла в них квантуется с неопределённостью

до $1 \cdot 10^{-9}$ в относительно слабых магнитных полях (с индукцией вплоть до 3,5 Тл) при температуре до 10 К и при токе до 0,5 мА, в то время, как образцы на GaAs обычно работают при токах в десятки микроампер при температуре до 2 К и магнитной индукции более или около 10 Тл. Это говорит об огромном потенциале графена для разработки удобных и универсальных квантовых эталонов, допускающих их более широкое использование в различных отраслях промышленности и науки, а не только в национальных метрологических институтах. Кроме того, совпадение квантованного сопротивления Холла в графене и GaAs/AlGaAs с суммарной относительной неопределённостью $8,2 \cdot 10^{-11}$ подтверждает универсальность КЭХ. Это также является свидетельством связи квантованного сопротивления Холла с h и e , что имеет решающее значение для новой системы единиц СИ, которая основана на фундаментальных константах природы.

Заключение. В ноябре 2018 г. на Генеральной конференции по мерам и весам была утверждена новая редакция системы СИ, основанная на семи константах, значения которых точно известны. Среди этих констант заряд электрона и постоянная Планка. Отпала необходимость в независимых от СИ постоянных. Решение об отмене констант Джозефсона и Клитцинга, введённых 20 лет назад, содержится в решении конференции. Отношение h/e^2 в новой системе точно известно и выражается в виде бесконечной дроби:

$$h/e^2 = 25812,80745930450666004551 \rightarrow 6706087443042457273221403421... \text{ Ом}$$

Имя фон Клитцинга постоянная сохранила в честь признания заслуг учёного и открытого им удивительного эффекта – КЭХ [20].

Благодарности. Автор благодарен Л. К. Исаеву за предложение темы статьи и И. Я. Краснополюну за прочтение рукописи статьи до публикации и полезные замечания.

Список литературы

1. 16 November 2018: Historic day for metrology. URL: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM-2018/Presentation-CGPM26-Klitzing.pdf> (дата обращения: 02.12.2020).
2. Quinn T. J., *Metrologia*, 1989, vol. 26(1), pp. 69–74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/26/1/006>
3. K. v. Klitzing, Dorda G., and Pepper M., *Physical Review Letters*, 1980, vol. 45, no. 6, pp. 494–497. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.494>
4. Семенчинский С. Г. Об электрических единицах СИ // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 2 (159). С. 7–9.
5. Семенчинский С. Г., Эдельман В. С. Полевой транзистор и постоянная тонкой структуры // Природа. 1982. № 9. С. 38–41.
6. Пудалов В. М., Семенчинский С. Г. Нелинейные явления в квантовом эффекте Холла // ЖЭТФ. 1984. Т. 86. С. 1431–1445.

7. Pudalov V. M., Semenchinsky S. G., Edelman V. S., *Solid State Communications*, 1984, vol. 51, no. 9, pp. 713–717. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(84\)90953-0](https://doi.org/10.1016/0038-1098(84)90953-0)
8. Семенчинский С. Г. Влияние тока в канале МДП-структуры на ее заряд в условиях квантового эффекта Холла // ЖЭТФ. 1986. Т. 91. С. 1804–1814.
9. Eisenstein J. P., Stormer H. L., Narayanamurti V., Cho A. Y., Gossard A. C., Tu C. W., *Physical Review Letters*, 1985, vol. 55, no. 8, pp. 875–878. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.875>
10. Hartland A., Jones K., Williams J. M., Gallagher B. L., Galloway T., *Physical Review Letters*, 1991, vol. 66, pp. 969–973. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.969>
11. Jeckelmann B., Jeanneret B., *Physical Review B*, 1997, vol. 55, iss. 19, pp. 13124–13134. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.13124>
12. Jeckelmann B., Inglis A. D., and Jeanneret B., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 1995, vol. 44, no. 2, pp. 269–272. <https://doi.org/10.1109/19.377828>
13. Novoselov K. S., Geim A. K., Dubonos S. V., Hill E. W., Grigorieva I. V., *Nature*, 2003, vol. 426, pp. 812–816. <https://doi.org/10.1038/nature02180>
14. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A., *Science*, 2004, vol. 306, pp. 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
15. Novoselov K. S., Jiang Z., Zhang Y., Morozov S. V., Stormer H. L., Zeitler U., Maan J. C., Boebinger G. S., Kim P., Geim A. K., *Science*, 2007, vol. 315, iss. 5817, p. 1379. <https://doi.org/10.1126/science.1137201>
16. Giesbers A. J. M., Rietveld G., Houtzager E., Zeitler U., Yang R., Novoselov K. S., Geim A. K., Maan J. C., *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, no. 22. <https://doi.org/10.1063/1.3043426>
17. Tzalenchuk A., Lara-Avila S., Kalaboukhov A., Paolillo S., Syvajarvi M., Yakimova R., Kazakova O., Janssen T. J. B. M., Fal'ko V., and Kubatkin S., *Nature Nanotechnology*, 2010, vol. 5, pp. 186–189. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.474>
18. Janssen T. J. B. M., Fletcher N. E., Goebel R., Williams J. M., Tzalenchuk A., Yakimova R., Lara-Avila S., Kubatkin S., Fal'ko V. I., *New Journal of Physics*, 2011, vol. 13, 093026-6. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/9/093026>
19. Ribeiro-Palau R., Lafont F., Brun-Picard J., Kazazis D., Michon A., Cheynis F., Couturaud O., Consejo C., Jouault B., Poirier W., Schopfer F., *Nature Nanotechnology*, 2015, vol. 10, pp. 965–971. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.192>
20. NIST. Fundamental Physical Constants. Von Klitzing constant. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?rk> (дата обращения: 02.12.2020).

References

1. 16 November 2018: Historic day for metrology. URL: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM-2018/Presentation-CGPM26-Klitzing.pdf> (дата обращения: 02.12.2020).
2. Quinn T. J., *Metrologia*, 1989, vol. 26(1), pp. 69–74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/26/1/006>

3. K. v. Klitzing, Dorda G., and Pepper M., *Physical Review Letters*, 1980, vol. 45, no. 6, pp. 494–497.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.494>
4. Semenchinskiy S. G., Ob elektricheskikh edinitsakh SI, *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2019, no. 2(159), pp. 7–9 (in Russian).
5. Semenchinskiy S. G., Elelman V. S., Polevoi tranzistor i postoyannaya tonkoi struktury, *Priroda*, 1982, no. 9, pp. 38–41 (in Russian).
6. Pudalov V. M., Semenchinskii S. G., *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1984, vol. 59 (4), pp. 838–846.
7. Pudalov V. M., Semenchinsky S. G., Edelman V. S., *Solid State Communications*, 1984, vol. 51, no. 9, pp. 713–717.
[https://doi.org/10.1016/0038-1098\(84\)90953-0](https://doi.org/10.1016/0038-1098(84)90953-0)
8. Semenchinskii S. G., *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1986, vol. 91, pp. 1068–1074.
9. Eisenstein J. P., Stormer H. L., Narayanamurti V., Cho A. Y., Gossard A. C., Tu C. W., *Physical Review Letters*, 1985, vol. 55, no. 8, pp. 875–878. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.875>
10. Hartland A., Jones K., Williams J. M., Gallagher B. L., Galloway T., *Physical Review Letters*, 1991, vol. 66, pp. 969–973.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.969>
11. Jeckelmann B., Jeanneret B., *Physical Review B*, 1997, vol. 55, iss. 19, pp. 13124–13134.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.13124>
12. Jeckelmann B., Inglis A. D., and Jeanneret B., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 1995, vol. 44, no. 2, pp. 269–272. <https://doi.org/10.1109/19.377828>
13. Novoselov K. S., Geim A. K., Dubonos S. V., Hill E. W., Grigorieva I. V., *Nature*, 2003, vol. 426, pp. 812–816.
<https://doi.org/10.1038/nature02180>
14. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A., *Science*, 2004, vol. 306, pp. 666–669.
<https://doi.org/10.1126/science.1102896>
15. Novoselov K. S., Jiang Z., Zhang Y., Morozov S. V., Stormer H. L., Zeitler U., Maan J. C., Boebinger G. S., Kim P., Geim A. K., *Science*, 2007, vol. 315, iss. 5817, p. 1379.
<https://doi.org/10.1126/science.1137201>
16. Giesbers A. J. M., Rietveld G., Houtzager E., Zeitler U., Yang R., Novoselov K. S., Geim A. K., Maan J. C., *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, no. 22.
<https://doi.org/10.1063/1.3043426>
17. Tzalenchuk A., Lara-Avila S., Kalaboukhov A., Paolillo S., Syvajarvi M., Yakimova R., Kazakova O., Janssen T. J. B. M., Fal'ko V., and Kubatkin S., *Nature Nanotechnology*, 2010, vol. 5, pp. 186–189.
<https://doi.org/10.1038/nnano.2009.474>
18. Janssen T. J. B. M., Fletcher N. E., Goebel R., Williams J. M., Tzalenchuk A., Yakimova R., Lara-Avila S., Kubatkin S., Fal'ko V. I., *New Journal of Physics*, 2011, vol. 13, 093026-6.
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/9/093026>
19. Ribeiro-Palau R., Lafont F., Brun-Picard J., Kazazis D., Michon A., Cheynis F., Couturaud O., Consejo C., Jouault B., Poirier W., Schopfer F., *Nature Nanotechnology*, 2015, vol. 10, pp. 965–971. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.192>
20. NIST. Fundamental Physical Constants. Von Klitzing constant, available at: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?rk> (accessed: 02.12.2020).

Статья поступила в редакцию 02.07.2020;
принята к публикации 02.08.2020.