

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ КВАНТОВОГО ЭТАЛОНА ТОКА

И. А. Кон, А. Н. Выставкин., А. С. Ильин, А. Г. Коваленко

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва,
Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2016 г.

Аннотация. Рассмотрены современные методы формирования одноэлектронных приборов, подходящих для метрологических экспериментов. Для наиболее перспективной конструкции - полупроводниковых квантовых точек, проведен сравнительный анализ методов формирования одномерных проводников, на базе которых формируются квантовые точки электростатическими затворами.

Ключевые слова: одноэлектроника, электронный насос, одномерные структуры, нанопровод, стандарт тока, литография высокого разрешения.

Abstract. The realization of the quantum metrology triangle offers a great breakthrough in metrology. Moreover, it will aid in the refinement of fundamental constants, namely the elementary charge and the Planck constant. Currently, there are no commercially available fundamental current sources, unlike those for frequency and voltage. We review single electron devices designs, which are suitable as a current standard for the quantum metrology triangle. Quantum dot semiconductor electron pumps offer a best combination of ampacity and accuracy. The main component of such devices is a single-dimensional wire, on which is turned into a series of quantum dots with electrostatic gates. Different are fabrication technology concepts are compared. Top-down fabrication offers excellent placement control, however requires expensive equipment. Bottom-up fabrication allows nanowire mass production, with a possibility of different doping zones in-situ. The main drawback is the transfer of the nanowires to a substrate and the subsequent integration into the measurement circuit.

Key words: single electron devices, electron pump, one-dimensional structures, nanowire, current standard, high resolution lithography.

Введение

В настоящее время для современной метрологии [1-3] представляет большой интерес так называемый “квантовый метрологический треугольник” [3,4], предложенный еще в 1985 году [4]. Суть квантового метрологического треугольника заключается в том, чтобы связать три физические величины - частоту, силу тока и напряжение, посредством фундаментальных соотношений. Так, частота связана с силой тока блоховскими осцилляциями, сила тока с напряжением - квантовым эффектом Холла, а сила тока с частотой - эффектом Джозефсона.

Обладая квантовыми эталонами упомянутых величин, возможно, с одной стороны, уточнить такие фундаментальные постоянные, как постоянная Планка и элементарный заряд. С другой стороны, можно использовать эти соотношения для переопределения килограмма через физические величины с природными эталонами [5,6].

Эталонные источники частоты и напряжения, как и приборы с эталонным сопротивлением доступны в виде промышленных изделий. В то же время, промышленного образца эталонного источника тока до сих пор не существует. Идея квантового эталонного источника тока заключается в том, чтобы контролировать туннелирование отдельных электронов через барьер, посредством сигнала от генератора с эталонной частотой (контролируемого атомными часами) [6].

Одноэлектронные приборы

Приборы с кулоновской блокадой

Первый прибор - одноэлектронный транзистор [7], с туннелированием единичных электронов, был основан на явлении кулоновской блокады и продемонстрирован в 1990 году. Он представлял собой металлическую

структуру с четырьмя туннельными переходами и одним активным затвором. В устройствах с кулоновской блокадой существует источник шума, связанный с сотуннелированием электронов [8]. Во время туннелирования одного электрона, есть вероятность, что протуннелирует еще один. Эффект сотуннелирования в ранних приборах не позволял установить силу тока с погрешностью лучше чем 10^{-5} , что недостаточно для метрологии. Теоретический анализ сотуннелирования [9] показал, что увеличение числа переходов существенно снижает ошибку. Так для прибора с пятью переходами, погрешность составляет 10^{-8} , что было продемонстрировано в 1999 году [10]. Другой сложностью в применении приборов с кулоновской блокадой, является существенное ограничение силы тока. Максимальная сила тока для подобных приборов составила 5 пА, тогда как согласно [6], для осуществления измерений, связанных с квантовым метрологическим треугольником, необходимая сила тока должна быть как минимум 100 пА. Ограничение силы тока, в приборах с кулоновской блокадой проистекает из константы времени туннелирования $C \cdot R$, где C - емкость металлического островка, а R - сопротивление туннельного барьера [11]. Практическая величина рабочей частоты не более 20 МГц.

Полупроводниковые приборы

В полупроводниковых приборах с туннелированием единичных электронов на одномерный проводник накладываются затворы, создавая квантовые точки. В отличие от металлических островков, спектр электронов в полупроводниковой квантовой точке дискретен, что позволяет легко создать квантовую точку, содержащую нужное количество электронов [12]. Основное достоинство полупроводниковых квантовых точек - возможность управлять электростатическими барьерами. В первых экспериментах с электронным транспортом в квантовых точках [13-15] применялись структуры из арсенида галлия. Диаметр квантовой точки составлял 300 нм, а энергия заряда $\sim 0,67$ мэВ. На квантовую точку подавалось смещение, а также переменный сигнал на затворы. Если напряжение смещения позволяло электронам получить энергию,

больше чем энергия заряда, происходило туннелирование нескольких электронов, таким образом было впервые продемонстрировано квантование тока в приборе с квантовой точкой. Поскольку в таких приборах емкость очень мала, а периодическое снижение электростатических барьеров практически нивелирует сопротивление туннелирования, рабочая частота может достигать до десятков гигагерц, а также возможно и большое значение тока. В работе [16] экспериментально показана сила тока 150 пА с погрешностью $1,2 \cdot 10^{-6}$, при этом основная составляющая погрешности - резистор, используемый в качестве источника тока. В работе [17] была показана сила тока 560 пА при рабочей температуре 17К. Погрешность составила 10^{-3} вследствие несовершенства измерительной системы.

Другие типы приборов

Стоит еще упомянуть устройства на основе поверхностных акустических волн, в которых квантовые точки создаются стоячими волнами в диэлектрической подложке. В то время как сила тока в таких приборах может быть очень значительной - в [18] рассмотрен прибор с наибольшей силой тока 430 пА, погрешность остается существенной, порядка 10^{-3} . Предположительная причина - спонтанное туннелирование.

Формирование одномерных проводников

Основным элементом подавляющего большинства одноэлектронных приборов на квантовых точках является одномерный проводник, на который накладываются электростатические затворы. Методы формирования одномерных проводников, подразделяются на две категории. Одномерные структуры, получаемые при осаждении или травлении вещества через маску нередко именуется технологией “сверху вниз”, тогда как прямой рост одномерных проводов - нанопроводов, где исходное вещество спонтанно собирается на центрах роста из нетвердого состояния, носит название “снизу вверх” [19,20].

Сверху вниз

Технология “сверху вниз” подразумевает осаждение или травление через маску пленок, образуя одномерные структуры в плоскости, параллельной маске, или анизотропное травление массивного монокристалла, образуя одномерные структуры в плоскости перпендикулярной маске. Следует отметить, что вопрос формирования протравливаемых пленок чрезвычайно обширен и не будет рассмотрен в этой статье. Главной проблемой, встающей на пути технологии “снизу вверх”, является формирование маски.

Основным средством создания масок в микроэлектронике является оптическая литография. При формировании одномерных структур, длина волны засвечивающего излучения может стать препятствием на пути получения необходимого разрешения. Выходом из этой ситуации может послужить применение технических решений, таких как иммерсионная или интерференционная литография. Другой вариант - уменьшение длины волны, используя экстремальный ультрафиолет или рентгеновское излучение.

Процесс интерференционной литографии [21], представляет собой проецирование интерференционной картины от двух лучей лазера на фоторезист. Поскольку расстояние между линиями в интерференционной картине составляет $(\lambda/2n) \times \sin(\theta/2)$, где λ - длина волны, n - коэффициент преломления резиста, а θ - угол пересечения лазерных лучей, представляется возможность формировать периодические структуры с разрешением существенно лучше длины волны. Последовательная засветка разными интерференционными картинками позволяет получать довольно сложные структуры [22]. Тем не менее, ограниченные возможности комбинирования интерференционных проекций не позволяют засвечивать произвольные структуры. Иммерсионная литография [23] позволяет повысить разрешение за счет погружения последней линзы оптической системы в среду, с коэффициентом преломления, большим чем у воздуха.

Системы, в которых разрешение повышается за счет меньшей длины волны излучения представляются перспективными, однако, сопряжены с существенными техническими сложностями. Так экстремальный ультрафиолет с длиной волны порядка 13 нм [24], существенно поглощается воздухом, что требует проводить засветку в условиях вакуума. Это накладывает некоторые ограничения на используемый резист, а также существенно усложняет загрузку подложек. Системы рентгеновской литографии обладают длиной волны меньше 1 нм [25]. Однако для них требуется синхротронное излучение, что требует очень дорогостоящего оборудования.

Другой класс методов формирования масок - применение электронно-лучевой и ионно-лучевой литографии. Электронно-лучевая литография позволяет формировать маски с деталями до пяти нанометров [26, 27]. Из недостатков электронно-лучевой литографии следует отметить небольшое поле экспозиции и достаточно длительное время зарисовки. Электронные резисты, позволяющие получать большое разрешение, требуют длительной экспозиции. Решение проблемы сочетания чувствительности и разрешения резиста может быть в применении резистов с химическим усилением [28], однако, этот вопрос все еще находится на стадии исследований. Многолучевая электронная литография - разделение электронного луча или использование нескольких источников электронов, может существенно ускорить процесс засветки, однако, тоже находится на стадии разработки [29]. Необходимо упомянуть эксперимент, в котором резист был засвечен проекцией просвечивающего электронного микроскопа, при наблюдении атомной структуры монокристаллического кремния [30]. Использование ионов вместо электронов позволяет получить более высокое разрешение [31]. Ионы с той же энергией, что и электроны, обладают существенно меньшей скоростью и преодолевают существенно меньшие расстояния в резисте. Более того, они не создают вторичных электронов, что позволяет более точно засвечивать резист. Ионная литография показала эффективность на три порядка больше, чем электронная, с той же энергией частиц [32].

Снизу вверх

Нередко встречаются одноэлектронные приборы, основанные на предварительно выращенных нанопроводах [33-35]. При росте нанопроводов в основном применяется технология пар-жидкость-кристалл (ПЖК) [36]. Механизм ПЖК основан на конденсации паров исходного материала на затравочных частицах, с чего начинается однонаправленный рост. От материала затравочных частиц во многом зависит дальнейший рост нанопровода, в частности его кристаллическая структура [37]. Выбор исходного материала тоже существенно влияет на качество нанопроводов. В принципе, могут быть использованы органические соединения выращиваемого вещества, однако гидриды предпочтительнее [38]. С одной стороны водород является очень чистым побочным продуктом, с другой он ингибирует окисление. По аналогии с ПЖК, существуют следующие механизмы: сверхкритическая жидкость-жидкость-кристалл, сверхкритическая жидкость-кристалл-кристалл, раствор-жидкость-кристалл, пар-кристалл-кристалл [36, 39-42]. Для всех рассмотренных методов характерно наличие затравочных частиц. Обычно затравочные частицы - это металл, с которым материал нанопровода образует сплав. Тем не менее, показаны случаи автокаталитического роста [43]. В качестве затравочных частиц обычно используют золото, либо в качестве коллоидных наночастиц, либо как конденсированные пары. Тем не менее, золото не очень хорошо подходит для полупроводниковой технологии. К примеру, золото является акцептором глубокого уровня для кремния. Более того, золото очень химически инертно, соответственно для его последующего удаления необходимо применять сильные химические вещества, такие как царская водка, цианиды или йодид калия. Эти вещества могут повредить нанопровода или создать нежелательные примесные уровни [44]. В связи с этим, при росте кремниевых нанопроводов нередко используется висмут или алюминий. Наряду с кремнием, примерами материалов нанопроводов могут быть фосфат индия, нитрид галия и оксид олова.

Заключение

Были рассмотрены разные подходы к созданию одноэлектронных приборов, подходящих для экспериментов с квантовым метрологическим треугольником. На данный момент, наиболее перспективным подходом логично считать наносы заряда на основе полупроводниковых квантовых точек. В то время, как большая часть исследования нацелена на создание приборов используя методы литографии для формирования наноструктур, существуют и группы, исследующие наноприборы с единичными зарядами - одноэлектронные транзисторы и квантовые насосы на основе выращенных нанопроводов.

Одномерные структуры, изготавливаемые по технологии “сверху вниз”, получают расположенными на подложке в заранее заданном положении и желаемой формы. В то же время, размещение на подложке нанопроводов, полученных по технологии “снизу вверх”, требует дополнительных манипуляций. Именно поэтому, во многих случаях, технология “сверху вниз” предпочтительнее. Существенным преимуществом технологии “снизу вверх” является возможность легировать нанопровода *in-situ*. Таким образом, если нет необходимости в разных зонах легирования одномерной структуры, в лабораторных условиях наиболее предпочтительным представляется формирование маски посредством электронной литографии с последующим травлением.

Статья была написана при поддержке гранта РФФИ 16-07-00834.

Литература

- [1] Кононогов, С. А., М. Ю. Константинов, and В. В. Хрущев. "О некоторых методах переопределения эталона единицы массы". *Измерительная техника* 4 (2006): 3-7.
- [2] Zimmerman, Neil M., and Mark W. Keller. "Electrical metrology with single electrons." *Measurement Science and Technology* 14.8 (2003): 1237.

- [3] Piquemal, François, et al. "Fundamental electrical standards and the quantum metrological triangle." *Comptes Rendus Physique* 5.8 (2004): 857-879.
- [4] Likharev, K. K., and A. B. Zorin. "Theory of the Bloch-wave oscillations in small Josephson junctions." *Journal of Low Temperature Physics* 59.3-4 (1985): 347-382.
- [5] Bordé, Christian J. "Base units of the SI, fundamental constants and modern quantum physics." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 363.1834 (2005): 2177-2201.
- [6] Pekola, Jukka P., et al. "Single-electron current sources: Toward a refined definition of the ampere." *Reviews of Modern Physics* 85.4 (2013): 1421.
- [7] Geerligs, L. J., et al. "Frequency-locked turnstile device for single electrons." *Physical review letters* 64.22 (1990): 2691.
- [8] Averin, D. V., and A. A. Odintsov. "Macroscopic quantum tunneling of the electric charge in small tunnel junctions." *Physics Letters A* 140.5 (1989): 251-257.
- [9] Averin, D. V., A. A. Odintsov, and S. V. Vyshenskii. "Ultimate accuracy of single-electron dc current standards." *Journal of applied physics* 73.3 (1993): 1297-1308.
- [10] Zorin, A. B., et al. "Coulomb blockade and cotunneling in single electron circuits with on-chip resistors: towards the implementation of r-pump." *arXiv preprint cond-mat/9912032* (1999).
- [11] Blumenthal, M. D., et al. "Gigahertz quantized charge pumping." *Nature Physics* 3.5 (2007): 343-347.
- [12] Hu, Yongjie, et al. "A Ge/Si heterostructure nanowire-based double quantum dot with integrated charge sensor." *Nature nanotechnology* 2.10 (2007): 622-625.
- [13] Kouwenhoven, L. P., et al. "Quantized current in a quantum-dot turnstile using oscillating tunnel barriers." *Physical Review Letters* 67.12 (1991): 1626.

- [14] Kouwenhoven, L. P., et al. "Quantized current in a quantum dot turnstile." *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* 85.3 (1991): 381-388.
- [15] Kouwenhoven, L. P., A. T. Johnson, N. C. Van der Vaart, A. Van der Enden, C. J. P. M. Harmans, and C. T. Foxon. "Quantized current in a quantum dot turnstile." *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* 85, no. 3 (1991): 381-388.
- [16] Giblin, S. P., M. Kataoka, J. D. Fletcher, P. See, T. J. B. M. Janssen, J. P. Griffiths, G. A. C. Jones, I. Farrer, and D. A. Ritchie. "Towards a quantum representation of the ampere using single electron pumps." *Nature communications* 3 (2012): 930.
- [17] Yamahata, Gento, Katsuhiko Nishiguchi, and Akira Fujiwara. "Gigahertz single-trap electron pumps in silicon." *Nature communications* 5 (2014).
- [18] Janssen, T. J. B. M., and A. Hartland. "Accuracy of quantized single-electron current in a one-dimensional channel." *Physica B: Condensed Matter* 284 (2000): 1790-1791.
- [19] Hobbs, Richard G., Nikolay Petkov, and Justin D. Holmes. "Semiconductor nanowire fabrication by bottom-up and top-down paradigms." *Chemistry of Materials* 24, no. 11 (2012): 1975-1991.
- [20] Santos, A., M. J. Deen, and L. F. Marsal. "Low-cost fabrication technologies for nanostructures: state-of-the-art and potential." *Nanotechnology* 26, no. 4 (2015): 042001.
- [21] Lu, Cheng, and R. H. Lipson. "Interference lithography: a powerful tool for fabricating periodic structures." *Laser & Photonics Reviews* 4, no. 4 (2010): 568-580.
- [22] Do, Yun Seon, Jung Ho Park, Bo Yeon Hwang, Sung-Min Lee, Byeong-Kwon Ju, and Kyung Cheol Choi. "Plasmonic Color Filter and its Fabrication for Large-Area Applications." *Advanced Optical Materials* 1, no. 2 (2013): 133-138.

- [23] French, Roger H., and Hoang V. Tran. "Immersion lithography: photomask and wafer-level materials." *Annual Review of Materials Research* 39 (2009): 93-126.
- [24] Kemp, Kevin, and Stefan Wurm. "EUV lithography." *Comptes Rendus Physique* 7, no. 8 (2006): 875-886.
- [25] Maldonado, Juan R., and Martin Peckerar. "X-ray lithography: Some history, current status and future prospects." *Microelectronic Engineering* 161 (2016): 87-93.
- [26] Yang, Joel KW, Bryan Cord, Huigao Duan, Karl K. Berggren, Joseph Klingfus, Sung-Wook Nam, Ki-Bum Kim, and Michael J. Rooks. "Understanding of hydrogen silsesquioxane electron resist for sub-5-nm-half-pitch lithography." (2009).
- [27] Manfrinato, Vitor R., Lin Lee Cheong, Huigao Duan, Donald Winston, Henry I. Smith, and Karl K. Berggren. "Sub-5keV electron-beam lithography in hydrogen silsesquioxane resist." *Microelectronic Engineering* 88, no. 10 (2011): 3070-3074.
- [28] Sim, Jae Hwan, Sung-Il Lee, Hae-Jeong Lee, Richard Kasica, Hyun-Mi Kim, Christopher L. Soles, Ki-Bum Kim, and Do Y. Yoon. "Novel Organosilicate Polymer Resists for High Resolution E-Beam Lithography." *Chemistry of Materials* 22, no. 10 (2010): 3021-3023.
- [29] Pain, Laurent, Serge Tedesco, and Christophe Constancias. "Direct write lithography: the global solution for R&D and manufacturing." *Comptes Rendus Physique* 7, no. 8 (2006): 910-923.
- [30] Lee, Hyo-Sung, Byung-Sung Kim, Hyun-Mi Kim, Jung-Sub Wi, Sung-Wook Nam, Kyung-Bae Jin, Ki-Bum Kim, and Yoshihiro Arai. "Electron beam projection nanopatterning using crystal lattice images obtained from high resolution transmission electron microscopy." In *SPIE OPTO: Integrated Optoelectronic Devices*, pp. 72221B-72221B. International Society for Optics and Photonics, 2009.

- [31] Sidorkin, V., E. van Veldhoven, and E. van der Drift. "van der; Alkemade, P.; Salemink, H.; Maas, D." *J. Vac. Sci. Technol., B* 27 (2009): 25.
- [32] Winston, Donald, Vitor R. Manfrinato, Samuel M. Nicaise, Lin Lee Cheong, Huigao Duan, David Ferranti, Jeff Marshman et al. "Neon ion beam lithography (NIBL)." *Nano letters* 11, no. 10 (2011): 4343-4347.
- [33] Lieber, Charles M., and Zhong Lin Wang. "Functional nanowires." *MRS bulletin* 32, no. 02 (2007): 99-108.
- [34] Fuhrer, Andreas, Carina Fasth, and Lars Samuelson. "Single electron pumping in InAs nanowire double quantum dots." *Applied Physics Letters* 91, no. 5 (2007): 052109.
- [35] d'Hollosy, S., M. Jung, A. Baumgartner, V. A. Guzenko, M. H. Madsen, J. Nygard, and C. Schönenberger. "Gigahertz quantized charge pumping in bottom-gate-defined InAs nanowire quantum dots." *Nano letters* 15, no. 7 (2015): 4585-4590.
- [36] Holmes, Justin D., Keith P. Johnston, R. Christopher Doty, and Brian A. Korgel. "Control of thickness and orientation of solution-grown silicon nanowires." *Science* 287, no. 5457 (2000): 1471-1473.
- [37] Dayeh, Shadi A., and S. T. Picraux. "Direct observation of nanoscale size effects in Ge semiconductor nanowire growth." *Nano letters* 10, no. 10 (2010): 4032-4039.
- [38] Lu, Wei, Jie Xiang, Brian P. Timko, Yue Wu, and Charles M. Lieber. "One-dimensional hole gas in germanium/silicon nanowire heterostructures." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102, no. 29 (2005): 10046-10051.
- [39] Yuan, Fang-Wei, and Hsing-Yu Tuan. "Supercritical fluid– solid growth of single-crystalline silicon nanowires: An example of metal-free growth in an organic solvent." *Crystal Growth & Design* 10, no. 11 (2010): 4741-4745.
- [40] Tuan, Hsing-Yu, Doh C. Lee, Tobias Hanrath, and Brian A. Korgel. "Germanium nanowire synthesis: An example of solid-phase seeded growth

- with nickel nanocrystals." *Chemistry of materials* 17, no. 23 (2005): 5705-5711.
- [41] Heitsch, Andrew T., Dayne D. Fanfair, Hsing-Yu Tuan, and Brian A. Korgel. "solution– liquid– solid (SLS) growth of silicon nanowires." *Journal of the American Chemical Society* 130, no. 16 (2008): 5436-5437.
- [42] Lensch-Falk, Jessica L., Eric R. Hemesath, Francisco J. Lopez, and Lincoln J. Lauhon. "Vapor-solid-solid synthesis of Ge nanowires from vapor-phase-deposited manganese germanide seeds." *Journal of the American Chemical Society* 129, no. 35 (2007): 10670-10671.
- [43] Bierman, Matthew J., YK Albert Lau, Alexander V. Kvit, Andrew L. Schmitt, and Song Jin. "Dislocation-driven nanowire growth and Eshelby twist." *Science* 320, no. 5879 (2008): 1060-1063.
- [44] Koch, R. H., and A. Hartstein. "Evidence for resonant tunneling of electrons via sodium ions in silicon dioxide." *Physical review letters* 54, no. 16 (1985): 1848.

Ссылка на статью:

Практические аспекты создания квантового эталона тока. И. А. Кон, А. Н. Выставкин., А. С. Ильин, А. Г. Коваленко. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017, №1, Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/5/text.pdf>