

Abdurahmonov Azizbek Abdurahim o'g'li
Farg'ona davlat universiteti tayanch doktoranti,
Bahromova (Toshpo'latova) Muhayyoxon Baxtiyor qizi
Andijon davlat universiteti magistranti,
Madaminov Xurshidjon Muxamedovich
Andijon davlat universiteti dotsenti, f.-m.f.n
Tel: 93 259-05-29, e-mail: sayfullo8128@mail.ru
UDK 621.315.592.3

Si/Ge geterotuzilmalarda Ge kvant nuqtalarining hosil bo'lishi

Annotatsiya: Maqolada Si/Ge geterotuzilmalarining zonaviy diagrammasi va Ge kvant nuqtalari kritik o'lchamlarini taqribiy baholash natijalari keltirilgan.

Kalit so'zlar: kvant nuqta, effektiv massa, ta'qiqlangan soha, og'ir kovak, taglik.

Образование квантовых точек Ge в гетероструктурах Si/Ge

Аннотация: В работе приведена зонная диаграмма Si/Ge гетероструктур и результаты приближённой оценки критических размеров Ge квантовых точек в Si/Ge гетероструктурах.

Калит сўзлар: квантовая точка, эффективная масса, запрещенная зона, тяжёлая дырка, подложка.

Formation of Ge quantum dots in Si/Ge heterostructures

Abstract: The paper presents the band diagram of Si/Ge heterostructures and the results of an approximate estimate of the critical sizes of Ge quantum dots in Si/Ge heterostructures.

Key words: quantum dot, effective mass, band gap, heavy hole, substrate.

Введение

Гетероструктуры с квантовыми точками стали популярными в области оптоэлектроники из-за того, что в них можно наблюдать эффекты пространственного квантования. Это происходит из-за ограничения

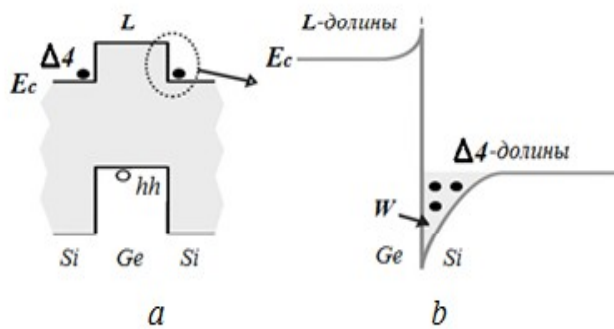
свободного движения заряженных частиц в трех направлениях, что придает им свойства искусственных атомов. Это ограничение приводит к изменению энергетического спектра заряженных частиц - возникновению дискретных уровней энергии и разрешенных зон в энергетической запрещенной зоне исходного полупроводника [1-3].

Обзор литератур

Квантовые точки (КТ) германия, полученные на кремниевых подложках или внутри Si, SiGe, SiO₂ слоев, представляют интерес как с научной, так и с практической точкой зрения [4-9]. Этот интерес обусловлен возможностью создания физических устройств оптоэлектроники, одноэлектронных транзисторов, энергонезависимых схем памяти, интегрированных с обычными кремниевыми интегральными схемами [4, 6-7]. Также квантовые точки значительно улучшают электронные и оптические свойства полупроводниковых структур за счет накопления и локализации заряженных частиц в квантовых островках полупроводников [4-7].

Методология исследования

Структура зонной диаграммы возле гетероэпитаксиального перехода играет ключевую роль в определении характеристик квантовых точек Si/Ge. Исследования дырочного газа в модулированных структурах Si/Ge показали, что основная часть изменений на энергетической диаграмме, связанных с разными ширинами запрещенной зоны, происходит в валентной зоне [10]. Было выявлено, что совпадение зонных диаграмм происходит за счет разрывов как в валентной, так и в зоне проводимости при смещении границ зон в направлении уровня вакуума. Этот тип совпадения, получивший название “согласование II типа” [4, 10], является ловушкой для тяжелых дырок (hh) вблизи потолка валентной зоны островков Ge, поэтому они играют ключевую роль как дырочные носители в КТ Ge/Si.



а – зонная структура без учета изгиба зон;
 б – изгиб зон на границе Si/Ge с учетом перераспределения носителей и выравнивания E_F .
 Полые кружки – тяжелые дырки (hh), сплошные – электроны; W – треугольная потенциальная яма в зоне проводимости Si на границе с Ge

Рис.1. Схема согласования зонных структур Si и Ge в квантовой точке [11]

Результаты и их обсуждения

В общем случае электроны не могут задерживаться внутри КТ Ge из-за более высокого положения дна зоны проводимости в КТ Ge, связанного с запрещенной зоной II типа. В таких энергетических условиях электроны покидают область КТ и переходят в окружающую кремниевую матрицу [6]. Вокруг КТ Ge образуются небольшие минимумы зоны проводимости в форме треугольника (см. рис. 1б). Это изгибание дна зоны проводимости объясняется различием уровней Ферми между Si и Ge, что приводит к появлению области пространственного заряда гетероперехода. Эти треугольные потенциальные ямы могли бы удерживать электроны в Si на внешней границе КТ Ge и представлять собой структуру для их рекомбинации с дырками внутри КТ [11]. Однако стоит отметить, что изгиб зон сравнительно небольшой ($\sim meV$), поэтому такие потенциальные ямы не достаточно глубокие, и захваченные электроны могут легко теряться из-за теплового возбуждения.

Использование квантовых точек (КТ) способствует существенному улучшению электронных и оптических характеристик приборных структур за счет накопления и локализации носителей заряда в квантово-размерных полупроводниковых островках [4, 6].

Для получения статуса КТ островок должен обладать свойством квантованности энергетических состояний носителей заряда (электронов или

дырок). Квантованность и квантовое ограничение имеют место, когда носители заряда ограничены расстояниями или размерами структур, сопоставимыми или меньшими длины волны де Бройля носителя в соответствующем материале. Для германия (Ge) при 300 К длина волны де Бройля составляет 5 нм для тяжелых электронов и 12 нм для тяжелых дырок, а для галлиевого арсенида (GaAs) – около 50 нм. Максимальный размер (d_{max}) квантовой точки материала ограничен длиной волны де Бройля носителя заряда в нем:

$$d_{max} = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{3 m^* kT}} = 107.87 \frac{K^{0.5}}{\sqrt{\frac{m^* T}{m_e}}} (nm) \quad (1)$$

Расчеты для различных типов эффективных масс электронов и дырок позволили установить значения длин волн де Бройля: 8 нм для тяжелых электронов, 38 нм для легких электронов, 20 нм для тяжелых дырок и 51 нм для легких дырок в германии при 100 К.

При понижении температуры ниже 100 К носители заряда в кремнии и германии начинают вымерзать, приводя полупроводники к становлению изоляторами. Таким образом, максимальный размер квантовой точки должен соответствовать рассчитанной для температуры около 100 К, примерно 20 нм для квантовой точки германия в кремнии, если учитывать только тяжелые дырки. Для сферической квантовой точки возможно решение задачи "частица в сфере", которая предоставляет выражение для минимального диаметра (d_{min}) частицы, содержащей по крайней мере одно связанное состояние [6]:

$$d_{min} = \frac{\pi h}{\sqrt{2 m^* \Delta E_{offset}}} = 38.53 \frac{1}{\sqrt{\frac{m^*}{m_e} \Delta E_{offset}}} (nm) \quad (2)$$

где ΔE_{offset} – соответствующий разрыв запрещенной зоны (в эВ) на границе КТ относительно окружающей матрицы. Разрывы запрещенной зоны на границе Si/Ge часто определяют экспериментально, например, по измерениям спектров фотолюминесценции (ФЛ) или проводимости. Так, в структурах Si/Ge/Si при измерении спектров ФЛ получили значения $\Delta E_{C offset} =$

10 мэВ и $\Delta E_{V \text{ offset}} = 350$ мэВ, которые соответствуют минимальному сферическому размеру 12 нм для тяжелых дырок.

Таким образом, параметрами, зависящими от материала и определяющими минимальные размеры квантовых точек, являются эффективная масса и разрыв запрещенной зоны на границе Si/Ge ($\Delta E_{C \text{ offset}}$). Согласно (2) при уменьшении $\Delta E_{C \text{ offset}}$ до нуля, минимальный размер КТ стремится к бесконечности, пересекая значение максимального размера. Это указывает на то, что при слишком малых значениях $\Delta E_{C \text{ offset}}$ потенциальная яма не может содержать хотя бы одно связанное состояние носителей заряда. Нельзя создать кремниевую КТ в Si из-за разрыва запрещенной зоны, равного нулю. Также не удастся сформировать квантовые точки SiGe в Si, если сплав содержит слишком низкую концентрацию Ge.

Разрыв запрещенной зоны между объемными Si и Ge составляет 0,43 эВ, что соответствует минимальному размеру сферической точки в 11 нм (тяжелые дыры). Это близко к максимальному размеру (12 нм), найденному из уравнения без учета эффекта «голубого» сдвига ширины запрещенной зоны. Поэтому вычисленные из уравнения (1) минимальные размеры квантовых точек Ge являются лишь приблизительными оценками. Решение задачи вычисления минимального размера для одного связанного состояния в квантовой точке с пирамидальной формой намного сложнее и требует численных методов [4].

Заключения

Исследования в области КТ германия продолжаются, и они обещают открывать новые возможности для инноваций и технологических прорывов. Развитие этих материалов и структур может привести к созданию еще более компактных и эффективных устройств, обеспечивая прогресс в области микроэлектроники и оптоэлектроники.

Таким образом, КТ представляют собой многообещающий материал для различных приложений в современной электронике и оптоэлектронике.

Их уникальные свойства и возможность интеграции с существующими технологиями делают их важным объектом исследований и разработок для будущих инноваций и технологических достижений.

Литература

1. Aqua J.-N., Berbezier I., Favre L. Growth and self-organization of SiGe nanostructures // *Physics Reports*. – 2013. – V. 522. – P. 59-189.
2. Wang K. L., Cha D., Liu J., Chen C. Ge/Si self-assembled quantum dots and their optoelectronic device applications // *Proceedings of the IEEE*. – 2007. – V. 95. – P. 1866-1882.
3. Талочкин А. Б., Чистохин И. Б. // Спектр электрон-дырочных состояний структуры Si/Ge с квантовыми точками Ge // *ЖЭТФ*, 2011, том 140, вып. 3 (9), стр. 583-589.
4. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В., Соколов Л. В., Никифоров А. И., Якимов А. И., Фойхтлендер Б. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства // *ФТП*. – 2000. – Т. 34. – С. 1281-1299.
5. Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N. N. *Quantum Dot Heterostructures*. N. Y. : Wiley, 1999. 328 p.
6. Байматов П. Ж., Иноятлов Ш. Т., Мадаминов Х. М. Об устойчивости двух электронов в сферической квантовой точке. Фундаментальные и прикладные вопросы физики // *Материалы IV международной конференции посвященной 80-летию академика М.С.Саидова*. Ташкент, 2010, 24-25 ноября, С.179 – 180.
7. Якимов А.И. Гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge для фотоприемников среднего ИК диапазона // *Автометрия*. – 2013. - Т. 49. - С. 57-67.
8. Brunner K. Si/Ge nanostructures // *Reports on Progress in Physics*. – 2002. – V. 65. – P. 27-72.
9. Baribeau J.-M., Wu X., Rowell N.L., Lockwood D.J. Ge dots and nanostructures grown epitaxially on Si // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2006. – V. 18. – P. 139-174.

10. Yakimov A.I., Dvurechenskii A.V., Nikiforov A.I., Bloshkin A.A., Nenashev A.V., Volodin V.A. Electronic states in Ge/Si quantum dots with type-II band alignment initiated by space-charge spectroscopy // Physical Review B. – 2006. – V. 73. – P. 115333 (1-8).
11. Перспективные технологии в нано- и оптоэлектронике: пособие / А.А. Афоненко и др. – Минск : БГУ, 2018. – 210 с.