

УДК 621.382.8

## ФОРМИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК (КТ) В ЗОНДОВОЙ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Ермилов А.И., Ивашов Е.Н.

ФГАОУ ВПО «Московский институт электроники и математики

Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва,

e-mail: [eivashov@hse.ru](mailto:eivashov@hse.ru), [ploskogubez@rambler.ru](mailto:ploskogubez@rambler.ru)

Разработаны устройства наноперемещений с зондами, выполняющие операции, необходимые для формирования квантовых точек. Показаны варианты выполнения устройств.

**Ключевые слова:** биметаллическая пластина (БМ), температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), пьезопривод, устройство наноперемещений.

## THE FORMATION OF QUANTUM DOTS (QD) IN PROBE NANOTECHNOLOGY

Ermilov A.I., Ivashov E.N.

FGAEU HPE "Moscow institute of electronics and mathematics The National research university

"High school of economics", Moscow, e-mail: [eivashov@hse.ru](mailto:eivashov@hse.ru), [ploskogubez@rambler.ru](mailto:ploskogubez@rambler.ru).

Devices of nanorelocation with the probes, the executing operations necessary for formation of quantum points are developed. Options of execution of devices are shown.

**Key words:** bimetal plate (BM), temperature coefficient of the linear expansion (TCLE), piezoelectric drive, device of nanorelocation.

Квантовые точки (КТ) – это изолированные наномасштабные объекты, чьи свойства существенно отличаются от свойств объемных материалов той же структуры и состава.

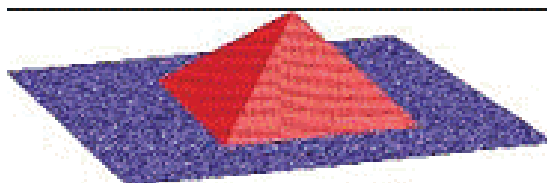
Размеры КТ слишком малы для того, чтобы проявления квантовых эффектов в них были существенными. КТ являются гетероструктурами с пространственным ограничением носителей заряда во всех трех направлениях, в которых можно "хранить" небольшие количества электронов.

Реальная КТ может иметь форму пирамиды и состоять из сотен тысяч атомов (Рис.1). Поэтому КТ называют искусственными атомами. Размеры КТ - порядка нескольких нм.

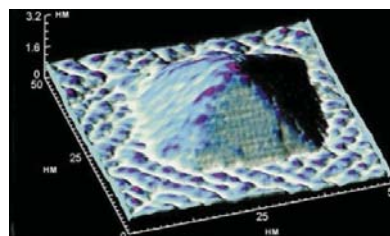
Механизм действия большинства полупроводниковых устройств и приборов основан на регулировании потока электронов.

В настоящее время транзисторы имеют размер в несколько мкм и управляют движением "потока", содержащего от сотен тысяч до 1 миллиона электронов. В отличие от них, КТ управляют движением лишь очень небольшого числа электронов (вплоть до управления одиночными атомами!), так что их можно назвать многоэлектронными (или даже одноэлектронными) транзисторами.

Если на кристаллическую поверхность кремния или арсенида галлия нанести небольшое число атомов другого вещества (например, атомов германия и т.п.), то через некоторое время можно наблюдать, как эти "чужеродные" атомы сами собираются в некоторые структуры (так называемые "островки") размеров в несколько десятков нм. Структуры такого типа и являются квантовыми точками, т.е. локальными об-



а)



б)

Рис. 1. а) КТ как пирамиды, состоящие из большого кол-ва атомов. б) КТ Германия (на кремниевой подложке), полученная растровым микроскопом РЭМ -100.

разованиями, представляющими собой трехмерные “ловушки” для электронов.

Вследствие способности управления КТ небольшим числом атомов, появляется возможность миниатюризации полупроводниковых устройств и снижения их энергопотребления, а также возможность создания приборов и устройств совершенно новых типов. В связи с этим были предложены нанотехнологические устройства, позволяющие формировать КТ

В основу устройства положена задача - обеспечить компенсацию перемещений острия зонда при изменении температуры технологической среды.

Рассмотрим нанотехнологическое устройство перемещения, представленное на рис. 2.

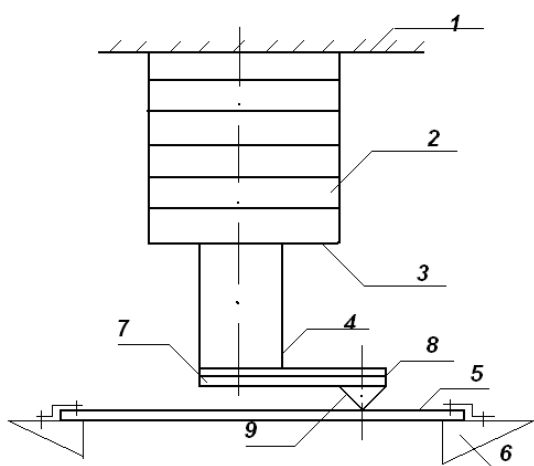


Рис.2. Нанотехнологическое устройство перемещения

Нанотехнологическое устройство для перемещения изделия содержит неподвижную платформу 1, жестко связанный с ней пьезопривод 2, на торце 3 которого закреплен зонд 4, с возможностью электрического взаимодействия с подложкой 5, установленной на подложкодержателе 6. С зондом 4 жестко связана биметаллическая пластина 7, на подвижном конце 8 которой закреплено острие 9.

Нанотехнологическое устройство перемещений работает следующим образом:

При подаче рабочего напряжения на пьезопривод 2, возникает тепловое расширение всего устройства в целом. Данный процесс вызывает изменение зазора между острием 9 зонда 4 и подложкой 5. Оно вызвано как подачей напряжения на нанотехнологическое устройство, так и изменением температуры во время выполнения операций. При изменении температуры технологической среды происходит изгиб биметал-

лической пластины (Рис.3), вызванный большим нагреванием одного металла относительно другого (При нагревании изгиб происходит в сторону пластины с меньшим коэффициентом линейного расширения). Таким образом, зазор между острием 9 зонда 4 и подложкой 5, в конечном итоге не изменяется.



Рис.3. Изгиб биметаллической пластины

Принцип работы биметаллической (БМ) пластины состоит в преобразовании изменения температуры в перемещение за счет различия термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов, входящих в его конструкцию. БМ пластина выполнена в виде двух скрепленных металлических полос, часто имеющих начальную кривизну. При изменении температуры кривизна меняется за счет изгиба пружины, и точки ее взаимно смещаются.

Изменение кривизны двухслойной пружины дается зависимостью:

$$\frac{6(\alpha_1 - \alpha_2)T}{\frac{(E_1 h_1^2 - E_2 h_2^2)^2}{E_1 E_2 h_1 h_2 (h_1 + h_2)} + 4(h_1 + h_2)} = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  – радиус кривизны двухслойной пружины,  $T$  – изменение температуры;  $\alpha_1, \alpha_2$  – ТКЛР материалов слоев 1 и 2;  $E_1, E_2, h_1, h_2$  – соответствующие модули упругости и толщины слоев.

Перемещение свободного конца определяется соотношением:

$$\lambda = 0,5L^2 / \rho ,$$

где  $L$  – длина деформируемой части пружины.

БМ пластины изготавливаются из двух спаянных, сваренных или совместно прокатанных тонких металлических пластин толщиной  $h_1$  и  $h_2$ . К материалу этих пластин предъявляются следующие требования: близкие значения модулей упругости  $E_1$  и  $E_2$  и допускаемых напряжений на изгиб  $[\sigma]_1$  и  $[\sigma]_2$ ; наибольшая разность между значениями ТКЛР  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ; хорошая свариваемость.

Введение в нанотехнологическое устройство для перемещений БМ пластины с закрепленным на ней острием обеспечивает возможность компенсации линейных перемещений острия зонда при изменении температуры технологической среды.

Для изготовления БМ пластин часто используются термобиметаллы, в которых в качестве слоя с малым  $\alpha_2$  применяется обычно инвар ЭН-36 – ферромагнитный сплав железа с 36% никеля, имеющий аномально малый температурный коэффициент линейного расширения ( $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  в интервале температур от  $-80$  до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ). В качестве слоя с большим  $\alpha_1$  используется латунь или немагнитная сталь. Для пластин, нагреваемых за счет тепла окружающей среды, применяются термобиметаллы марок ТБ-5, ТБ-6, ТБ-7.

Исходя из уравнения (1) для получения наибольшей чувствительности БМ пластины к изменению температуры необходимо соблюдать условие:

$$\frac{h_1}{h_2} = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$$

Для получения больших деформаций наиболее целесообразно увеличить длину пластины.

Для реализации процесса управления изгибом пластины можно использовать биморфы. Биморф состоит из двух одинаковых склеенных между собой пластин, между которыми находится металлическая фольга, являющаяся одним из электродов. Другим электродом служат металлические пластины на внешних гранях пьезоэлемента.

Несмотря на сложную управляемость процесса, устройство целесообразно использовать для получения КТ на подложке.

Основной задачей следующего нанотехнологического устройства является обеспечение управляемости процесса формирования КТ.

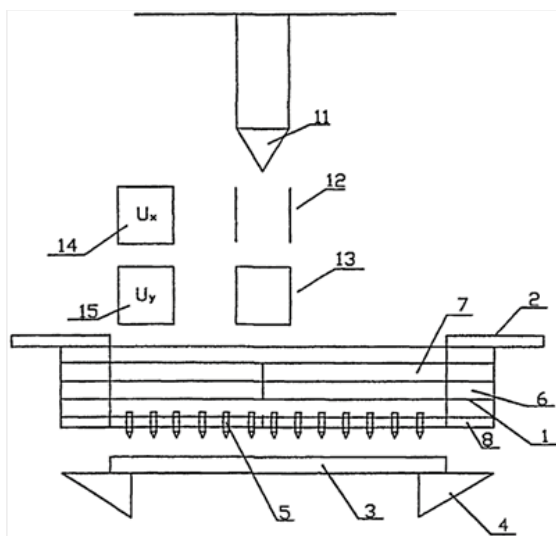


Рис.4. Нанотехнологическое устройство получения наномасштабных объектов на подложке

Нанотехнологическое устройство формирования КТ (рис.4.) состоит из многозондового пьезопривода 1, установленного на неподвижном основании 2, подложки 3, установленной на неподвижном подложкодержателе 4, электрически связанную с зондами 5, пьезопривод 1 выполнен в виде набора пьезоколец 6, соединенных в полой цилиндр 7, на торце 8 наружного кольца 9 закреплены диэлектрическая пластина 10 с закрепленными в ней зондами 5, устройство дополнительно снабжено электронной пушкой 11 и двумя парами конденсаторных пластин 12 и 13 расположенных по пути следования электронного луча, причем плоскости двух конденсаторных пластин взаимно перпендикулярны по отношению друг к другу, причем конденсаторные пластины связаны с узлами 14 и 15 подачи управляющих напряжений  $U_x$  и  $U_y$ .

Нанотехнологическое устройство формирования КТ работает следующим образом.

Пучок электронов, созданный электронной пушкой 11, направляется двумя парами конденсаторных пластин 12 и 13 и попадает на зонд, который отрицательно заряжается. При подаче на подложку 3 напряжения, между зондом 11 и подложкой 3 формируется туннельный ток, посредством которого на подложке 3 образуется КТ; (КТ образуется при взаимодействии туннельных электронов и рабочего газа)

Предложенная конструкция устройства обеспечивает управляемость процесса формирования КТ.

Следующее нанотехнологическое устройство обеспечивает большую производительность при формировании КТ.

Устройство для выполнения нанотехнологических операций (Рис.5) содержит неподвижное основание 1, установленный на нем пьезопривод 2, зондовый узел 3, связанный с пьезоприводом 2 и подложку 18, электрически связанную с зондовым узлом 3. Зондовый узел 3 выполнен в виде набора зондов 4, установленных в диэлектрической полой плате 5, с шагом 0,5-0,7 мм, причем вход 6 полости платы 5 связан с источником 7 жидкого азота, а выход 8 с приемником 9 жидкого азота. На тупых концах 10 зондов 3 закреплены оптоволоконные кабели 11, связанные в жгут 12 и соединенные с источником 13 лазерного излучения, а диэлектрическая полая плата 5 связана с пьезоприводом 2 посредством соединительного элемента 14, выполненного в виде трубы 15 с продольными сквозными прорезями 16 на цилиндрической части 17 трубы 15.

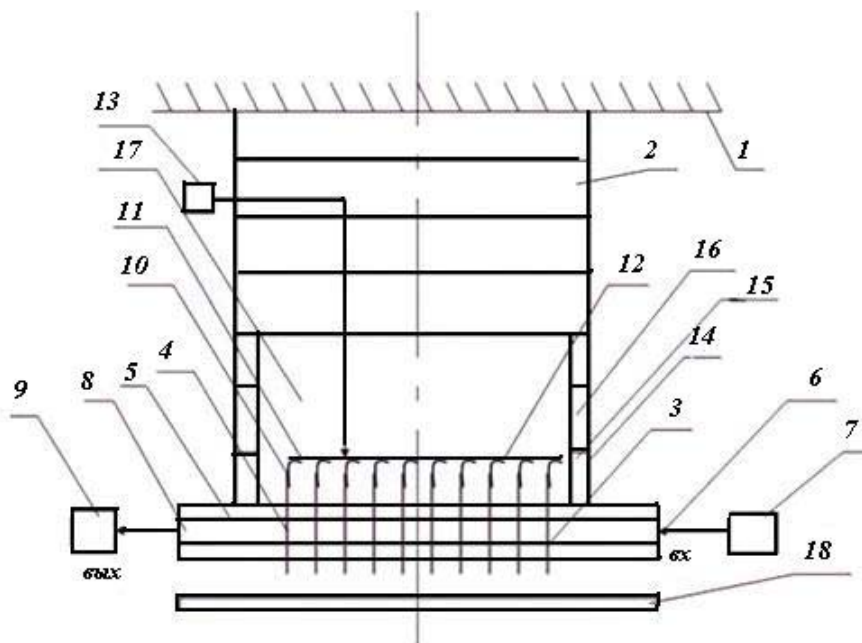


Рис.5. Устройство для выполнения нанотехнологических операций.

Устройство для выполнения нанотехнологических операций (рис.5) работает следующим образом.

При перемещении зондового узла 3 относительно подложки 18, источник лазерного излучения 13 посредством оптоволоконных кабелей 11 передает излучение и нагревает зонды 4. Охлаждение зондов 4 происходит путем подачи жидкого азота от источника жидкого азота 9 к входу полости 6 внутри диэлектрической полой платы 5, что приводит к уменьшению интенсивности процесса нагрева зондов 4 и стабилизирующей терморегуляции.

Применение предложенного нанотехнологического устройства позволяет поддерживать стабилизацию теплового режима в локальной зоне зонд-подложка.

#### Список литературы

1. Виноградов А.Н. Оптимизация биметаллического датчика температуры / НТК „Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления” – Датчик – 2002. – М.: МИЭМ, 1999. – С. 173-174
2. Ермилов А.И. Компенсация линейных перемещений зонда в нанотехнологии / НТК “студентов, аспирантов и молодых специалистов”. – М.: МИЭМ, 2013.
3. Патент РФ на полезную модель № 100765. Опубликовано 27.12.2010 г. Заявка № 2010119549 от 17.05.2010 г.
4. Патент РФ на полезную модель № 115123. Опубликовано 20.04.2012 г. Заявка № 2010119549 от 17.05.2010 г.
5. Патент РФ на полезную модель № 118120. Опубликовано 10.07.2012 г. Заявка № 2010119549 от 17.05.2010 г.