

Полевая электронная эмиссия из Ge-Si наноструктур с квантовыми точками

А. А. Дадыкин, Ю. Н. Козырев⁺, А. Г. Наумовец¹⁾

Институт физики НАН Украины, 03028 Киев, Украина

⁺Институт химии поверхности НАН Украины, 03680 Киев, Украина

Поступила в редакцию 24 июля 2002 г.

После переработки 12 сентября 2002 г.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены самоорганизованные массивы Ge-Si кластеров, размерами ~ 10 нм и плотностью $\sim 10^{10}$ см⁻². Обнаружена и исследована стабильная стационарная полевая электронная эмиссия из таких кластеров. Характеристики эмиссии отличаются наличием резонансных пиков тока, объясняемых квантованием энергии электронов в нанокластерах. Оценка энергии основного уровня их эмиссионных измерений совпадает с оценками, полученными другими методами.

PACS: 68.55.-a, 81.15.-z

Интерес к нанокластерным гетероструктурам Ge-Si обусловлен реальной возможностью создания на их основе принципиально новых приборов, использующих квантоворазмерные эффекты и работающих даже при $T \sim 300$ К. Уже разработаны [1] приемники ИК излучения в области 4–6 мкм с эффективностью, на 3–4 порядка превышающей эффективность приемников на базе III-V-гетероструктур. Это достигнуто благодаря получению однородных, с достаточно узким распределением по размерам, массивов квантовых точек Ge с габаритами < 10 нм. При таких размерах в Ge, несмотря на несколько большую, чем у полупроводников III-V, эффективную массу носителей зарядов, латеральное квантование уже снимает запрет на оптические переходы, поляризованные в плоскости приемника. Это резко увеличивает эффективность нуль-мерной системы по сравнению с объектами, имеющими двумерные квантовые долины.

Целью данной работы было получение массивов нанокластеров Ge с заданными параметрами, исследование их электронно-эмиссионных свойств и возможности проявления квантоворазмерных эффектов в полевой электронной эмиссии из квантовых точек (искусственных атомов).

Образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии Ge на (100)Si. Вследствие большего (4.2%) относительного несоответствия параметров решеток Ge и Si, на чистой Si подложке сразу формируются трехмерные кластеры Ge по механизму Фольмера-Вебера. Однако они легко отслаивают-

ся от подложки. Во избежание отслаивания кластеров наносился ряд буферных слоев твердого раствора $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$, поверх которых напылялась пленка чистого Ge толщиной в несколько монослоев. Благодаря меньшему несоответствию параметров решеток Ge пленки и $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ подложки, пленка растет по механизму Странского-Крастанова. Напыление пленок проводилось при температурах 350–750 °C, обеспечивающих подвижность атомов, достаточную для приведения системы в состояние термодинамического равновесия. Процесс роста контролировался по дифракции быстрых электронов, а химический состав поверхности – оже-спектроскопией.

Несмотря на существенную релаксацию упругих напряжений на буферной Si-Ge подложке, послойный рост пленки Ge, начиная с толщины 3–5 монослоев, сменяется образованием трехмерных кластеров, обеспечивающих минимизацию свободной энергии системы за счет уменьшения энергии упругих напряжений на вершинах кластеров.

Типичное изображение массива нанокластеров, полученное с помощью атомного силового микроскопа (АСМ), приведено на рис. 1а. Кластеры имеют квазипирамидальную форму с высотой 2–10 нм, размером при основании 10–40 нм и радиусом закругления вершины ~ 1 нм. Плотность кластеров превышает 10^{10} см⁻². Как размеры кластеров, так и расстояние между ними имеют сравнительно небольшой разброс относительно средних значений, то есть имеет место определенная самоорганизация системы. В данном случае движущей силой самоорганизации является стремление системы минимизировать свободную энергию за счет уменьшения энергии упругой

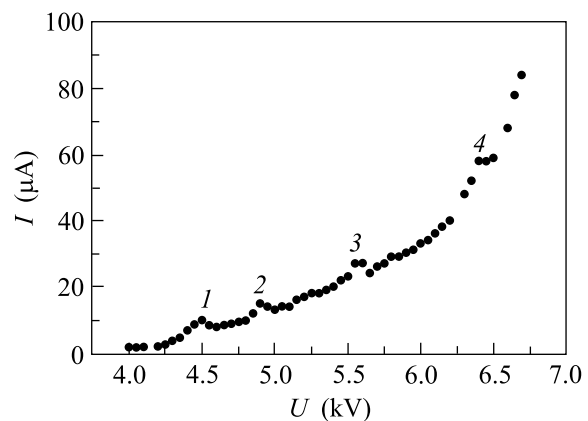
¹⁾e-mail: naumov@iop.kiev.ua

Рис.1.(а) АСМ изображение массива Ge-Si нанокластеров. (б) Фрагмент массива с hut-, dome- и superdome-кластерами

деформации, связанной с несоответствием решеток пленки и подложки.

В общем случае, как видно из рис.1b, образуются три типа кластеров, имеющие форму “хижины”, “купола” и “сверхкупола” (hut, dome и superdome). Изменением технологического режима можно обеспечить преимущественный рост любого из этих типов. Вершины, то есть части кластеров, состоящие преимущественно из Ge, можно рассматривать как квантовые точки (искусственные атомы). При радиусе закругления вершины ~ 1 нм электрические поля могут достигать значений $> 10^7$ В/см, необходимых для получения полевой эмиссии электронов, даже при относительно малых ($\sim 10^5$ В/см) макроскопических электрических полях. Такая же оценка электрического поля, необходимого для появления туннельной эмиссии, получается и при рассмотрении отдельных нанокластеров как искусственных атомов, подобных атому водорода (см., например, [2]).

Полевая электронная эмиссия была исследована в плоских диодных ячейках с анодом, покрытым катодолюминофором типа ZnS для визуализации эмиссии. Во всех случаях получена достаточно однородная по поверхности 1 см^2 стационарная полевая электронная эмиссия с плотностью тока $\sim 1 \text{ мА/см}^2$ при среднем электрическом поле в межэлектродном промежутке $\sim 10^5$ В/см. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) эмиссии при $T = 300 \text{ К}$ приведена на рис.2. Отличительной особенностью эмиссии из квантовых точек Ge является наличие пиков тока на ВАХ. Число пиков возрастает с увеличением средней высоты выращенных кластеров либо с ростом их

Рис.2. ВАХ полевой эмиссии из массива нанокластеров Ge-Si площадью 0.5 см^2

высоты (и изменением состава) за счет запыления материалом анода при отборе больших токов. В результате этого ВАХ сглаживаются. Расстояние по напряжению между пиками тока возрастает с номером пика n , что можно видеть из рис.2. Пики более четко проявляются на ВАХ, построенной в координатах Фаулера–Нордгейма $\lg(i/U^2) = f(U^{-1})$ (рис.3). Можно предположить, что появление пиков тока и их положение на ВАХ связано с квантованием энергии электронов в кластерах, которые в нашем случае можно рассматривать как квантовые точки (искусственные атомы). Обращает на себя внимание факт четкого проявления пиков тока, несмотря на заметный разброс кластеров по высоте. По-видимому, это связано с тем, что основной вклад в эмиссию вносят токи из кластеров, имеющих наименьший радиус закругления вершины и наибольшую высоту.

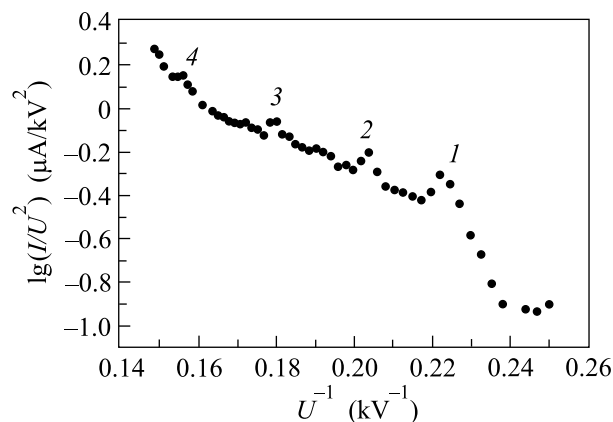


Рис.3. Характеристика полевой эмиссии из нанокластеров в координатах Фаулера–Нордгейма

Из-за сложности трехмерной задачи о полевой электронной эмиссии из квантово-размерного кластера сложной формы мы ограничимся рассмотрением одномерной модели потенциального ящика. Подобная модель была использована Дьюком и Алферьевым для описания полевой эмиссии сквозь отдельные адсорбированные атомы [3]. В нашем случае такое рассмотрение допустимо, так как сильное электрическое поле сосредоточено, в основном, в области вершины кластера, а шириной потенциальной ямы можно считать высоту пирамидального кластера. За глубину потенциальной ямы для электронов гетероперехода Si-Ge можно принять, пренебрегая влиянием деформации на энергетический спектр носителей заряда, разность ширин запрещенных зон Si и Ge, поскольку, как правило, Si и Ge, выращенные по эпитаксиальной технологии, обладают проводимостью p -типа из-за наличия вакансионных дефектов. В этом случае, в отличие от случая Si n -типа, рассмотренного в [4], в области гетероперехода Si-Ge образуется потенциальная яма для электронов.

Полученные результаты можно интерпретировать на основе энергетической диаграммы, приведенной на рис.4. Вследствие проникновения электрического поля в кластер дискретные уровни энергии электронов в потенциальной яме смещаются, и при совпадении уровня выхода электронов из Si с одним из уровней энергии в потенциальной яме на ВАХ возникает пик тока, то есть реализуется резонансное туннелирование.

В принятых допущениях энергия основного уровня квантования в потенциальной яме Si-Ge гетеросистемы получается равной $\Delta E \sim 100$ мВ, что хоро-

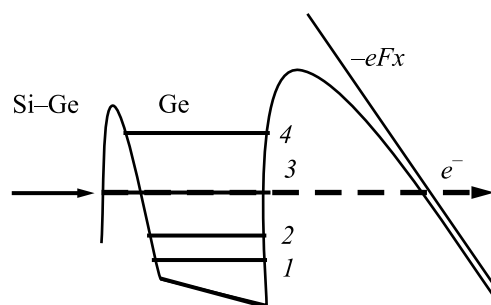


Рис.4. Энергетическая схема полевой эмиссии из Ge-Si нанокластера

шо согласуется с результатами электронной туннельной спектроскопии Si-Ge кластеров [5]. Электрическое поле внутри кластера, смещающее уровни на величину энергетического зазора между ними, можно оценить как $F = \Delta E/h$, где $h \sim 5$ нм – высота кластера. Оно оказывается равным $\sim 3 \cdot 10^5$ В/см и практически совпадает с макроскопическим полем, оцененным из геометрии испытательного диода. Наличие же необходимого для туннельной эмиссии электронов в вакуум электрического поля $F > 10^7$ В/см можно объяснить, исходя из геометрии кластеров с радиусом закругления вершины < 1 нм.

Таким образом, обнаруженная нами полевая электронная эмиссия из нанокластерных гетероструктур Ge-Si может служить эффективным методом исследования квантоворазмерных эффектов в таких структурах и физической основой для создания новых наноэлектронных приборов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национальной Академии Наук Украины по целевому проекту ВЦ/85. Авторы выражают признательность Ю. М. Литвину и П. М. Литвину за АСМ снимки нанокластеров.

1. P. Boucaud, V. Le Thanh, S. Sauvage et al., Appl. Phys. Lett. **74**, 401 (1999).
2. А. С. Давыдов, *Квантовая механика*, М.: Физматгиз, 1963.
3. С. D. Duke and M. E. Alferieff, J. Chem. Phys. **46**, 923 (1967).
4. А. В. Двуреченский, А. Н. Якимов, ФТП **35**, 1143 (2001).
5. А. I. Yakimov, V. A. Markov, A. V. Dvurechenskii, and O. P. Pchelyakov, J. Phys. Condens. Matter. **6**, 2573 (1994).