

Самоформирование квантовых точек Ge в гетероэпитаксиальной системе $\text{CaF}_2/\text{Ge}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ и создание туннельно-резонансного диода на ее основе

© Л.В. Соколов^{*,**}, А.С. Дерябин^{*}, А.И. Якимов^{*}, О.П. Пчеляков^{*}, А.В. Двуреченский^{*}

^{*} Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

^{**} Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

E-mail: sokolov@isp.nsc.ru

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии создана гетероэпитаксиальная структура $\text{CaF}_2/\text{Ge}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ (111) с квантовыми точками Ge. При комнатной температуре наблюдались отрицательная дифференциальная проводимость и осцилляции проводимости, обусловленные резонансным туннелированием дырок. Энергетическое расстояние между уровнями в квантовых точках, определенное из периода осцилляций, составляет 40–50 meV в зависимости от размера точек Ge.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-02-17900).

Низкоразмерные объекты, такие как квантовые точки (КТ), предоставляют возможность изучения одно-электронных и квантовых эффектов и пользуются неизменным вниманием исследователей. Минимальные размеры, наиболее интересные с точки зрения регистрации физических эффектов, достигаются у КТ, полученных методом самоформирования. Чаще всего для этого используют полупроводниковые гетеропары Ge/Si и InAs/GaAs. Известны также работы по созданию нанообъектов в матрице диэлектрика, например Si– CaF_2 [1] или Si– SiO_2 [2]. Однако в первом случае нанообъектами являлись тонкие полоски кремния, выращенные вдоль атомарных ступеней на поверхности пленки CaF_2 , а во втором создание нанообъектов происходило без использования эпитаксиальной технологии.

Представляется интересным использовать для создания КТ гетеропару Ge/ CaF_2 [3]. CaF_2 обладает очень широкой запрещенной зоной (≈ 12 eV), что позволяет надеяться на получение глубоких квантовых ям, и сравнительно легко выращивается методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на поверхности Si (111). Это позволяет в качестве подложки использовать гетеропару CaF_2/Si (111). CaF_2 , выращенный на поверхности Si, имеет кубическую кристаллическую структуру, причем параметр кристаллической решетки близок к параметру решетки кремния. Поэтому можно предположить, что, как и в гетеросистеме Ge/Si, эпитаксия пленок Ge на гетероструктуре CaF_2/Si будет сопровождаться самоформированием наноостровков Ge.

1. Эксперимент

Для создания гетероструктур CaF_2/Si в качестве подложки использовались пластины Si (111) p^+ -типа. После стандартной химической обработки с нанесением тонкого защитного окисла они помещались в сверхвысо-

ковакуумную камеру установки МЛЭ, где проводились окончательная очистка поверхности и выращивание гетероструктуры. Молекулярные пучки Ge и CaF_2 создавались тигельными источниками, причем молекулярный пучок CaF_2 формировался за счет сублимации объемного кристалла флюорита кальция из графитового тигля. Типичные скорости роста составляли ~ 0.16 nm/s для Ge и ~ 0.25 nm/s для CaF_2 . Структура поверхности при подготовке подложки и во время роста эпитаксиальных пленок Ge и CaF_2 контролировалась с помощью дифракции быстрых (~ 40 keV) электронов (ДБЭ) на отражение. Нагрев подложки производился излучением от нагревателя с Ta-лентой.

После очистки поверхности Si ДБЭ показывала четкую картину дифракции от сверхструктуры Si (111) 7×7 . Эта сверхструктура сменялась структурой (1×1) сразу после нанесения первых монослоев CaF_2 . Типичная картина рельефа пленки CaF_2 толщиной 10 nm приведена на рис. 1. Видно, что на поверхности пленки фторида кальция образуются плоские пирамиды, состоящие из атомно-гладких террас, разделенных моноатомными ступенями. Следует также сделать вывод, что уже при этой толщине пленки начинается пластическая релаксация механических напряжений несоответствия. Об этом свидетельствует система прямых линий, представляющих собой следы скольжения дислокаций. На данном этапе их плотность невелика, т.е. процесс релаксации механических напряжений находится в начальной стадии.

Для того чтобы обеспечить возможность изучения поперечного электрического транспорта в созданных структурах, слои диэлектрика, замуровывающие островки Ge, должны были быть туннельно-прозрачными для носителей заряда. Исходя из этого условия была выбрана толщина пленок $\text{CaF}_2 \sim 2$ nm. Найдено, что пленки CaF_2 имеют лучшие электрические характеристики,

если процесс их выращивания проводился в два этапа. Рост пленки производился при температуре подложки около 520°C , а затем образцы подвергались отжигу при $700\text{--}750^{\circ}\text{C}$ в течение часа. В результате такой процедуры удельное сопротивление пленок фторида возрастало на три порядка и составляло $\sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$.

После выращивания тонкой пленки фторида на ее поверхности формировался массив Ge-островков. Температура подложки в этом процессе составляла $430\text{--}490^{\circ}\text{C}$. По данным дифракции было установлено, что на начальной стадии роста пленка Ge имеет гладкую поверхность, а при средней толщине $\approx 3 \text{ nm}$ появляются островки. Это сопровождается резким изменением картины ДБЭ.

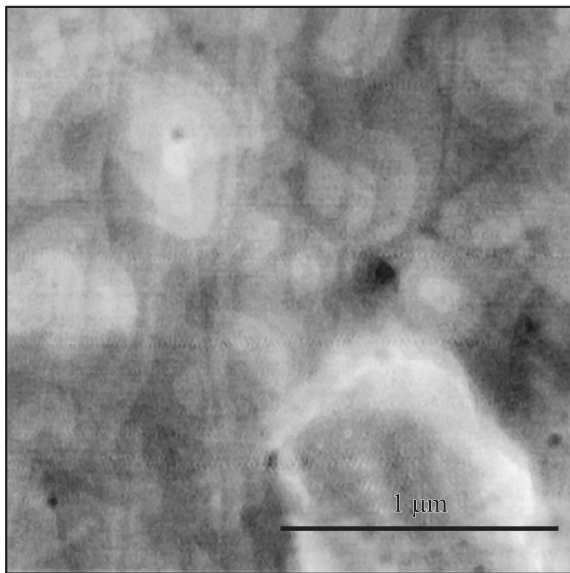


Рис. 1. Изображение рельефа поверхности эпитаксиальной пленки CaF_2 , полученное с помощью атомно-силового микроскопа.

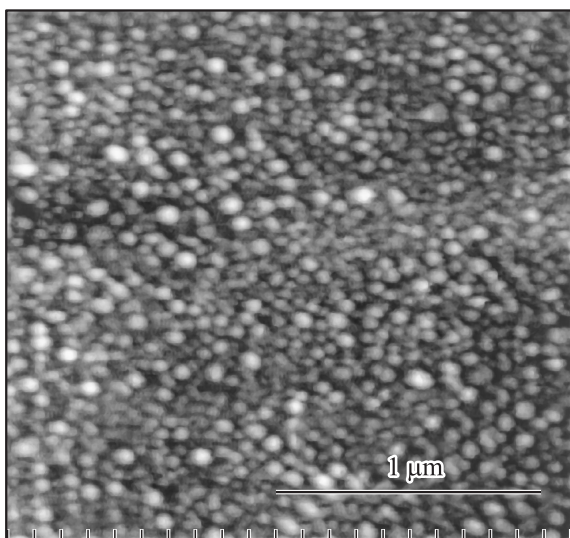


Рис. 2. Изображение гетероструктуры $\text{Ge}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ с островками Ge, полученное с помощью атомно-силового микроскопа.

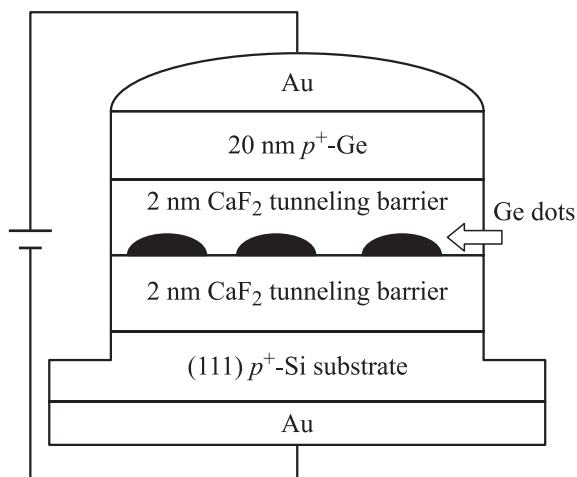


Рис. 3. Структура туннельно-резонансного диода на основе гетероструктуры $\text{CaF}_2/\text{Ge}/\text{CaF}_2/\text{Si}$.

Вместо протяженных дифракционных тяжей, типичных для гладкой поверхности пленки, появляются точечные рефлексы, что характерно для трехмерной дифракции на островках. Атомно-силовая микроскопия поверхности таких гетероструктур также показала присутствие островков (рис. 2).

После формирования островков Ge выращивалась вторая пленка CaF_2 толщиной 2 nm . После этого образец вновь отжигался при $700\text{--}750^{\circ}\text{C}$. На заключительном этапе на поверхности гетероструктуры выращивался слой Ge p^+ -типа толщиной 20 nm , который обеспечивал омический контакт при электрических измерениях.

Электрические измерения проводились на мезах (рис. 3) размером $0.7 \times 0.7 \text{ mm}$, которые изготавливались плазмохимическим травлением в среде CF_4 . Маской для травления и одновременно верхними контактами служили площадки Au, нанесенные на поверхность образцов вакуумным испарением.

2. Результаты электрических измерений

Дифференциальная проводимость полученных двухбарьерных структур $G = dI/dV$ измерялась при комнатной температуре с использованием стандартной двухзондовой методики. Амплитуда приложенного напряжения составляла $\sim 1 \text{ mV}$ при частоте 15 Hz . Результаты измерения туннельного тока как функции напряжения для двух образцов, полученных при разных условиях формирования островков Ge, приведены на рис. 4. Для обеих кривых характерны области нулевой проводимости и квазипериодические осцилляции с периодами $\Delta V \approx 100 \text{ mV}$ для образца № 131 и $\Delta V \approx 80 \text{ mV}$ для образца № 120. Хорошо наблюдаются также участки отрицательной дифференциальной проводимости. Структура осцилляций полностью воспроизводилась при мно-

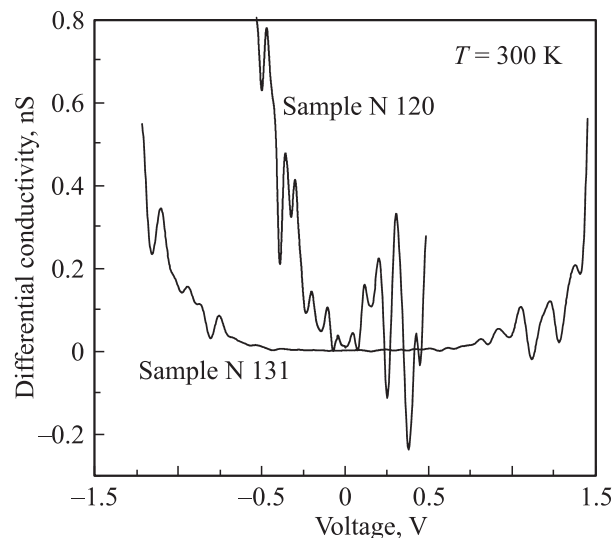


Рис. 4. Кривые зависимости дифференциальной проводимости от смещения.

гократном сканировании напряжения смещения. В то же время осцилляции полностью отсутствовали на аналогичных образцах, не содержащих КТ Ge.

На основании этих данных можно предположить, что наблюдаемые осцилляции проводимости вызваны скорее туннелированием дырок через энергетические состояния в Ge-островках, чем эффектами одночастичного заряда. Конечно, эффекты заряда играют важную роль в экспериментах по туннелированию, когда носитель тока задерживается в островке во время транспорта. Это возможно в сильно несимметричных туннельных переходах, в которых коэффициент перехода через второй (более толстый) барьер намного меньше, чем коэффициент перехода через первый (более тонкий) [4]. Ясно, однако, что это не относится к нашим двухбарьерным структурам, в которых оба барьера имеют одинаковую толщину.

Для симметричной структуры расстояние между пиками проводимости должно равняться удвоенной величине энергетического зазора между уровнями дырочных состояний в КТ. Соответственно энергетический зазор между отдельными уровнями в КТ Ge составлял 50 meV для образца № 131 и 40 meV для образца № 120. Различие между образцами обусловлено разными условиями формирования и, естественно, разным размером КТ. Если пленка Ge в образце № 120 выращивалась при 490°C, то для образца № 131 эта температура составляла 430°C. Снижение температуры привело к уменьшению размера островков и, как следствие, к увеличению энергетического зазора между квантовыми уровнями. По аналогии с самоорганизующимися наноструктурами Ge на поверхности Si(001) [5] можно предположить, что расстояние между энергетическими уровнями в 40–50 meV соответствует островкам Ge на поверхности $\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ размером 10–15 nm.

В заключение необходимо отметить, что гетероструктуры $\text{CaF}_2/\text{Ge}/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ с самоорганизующимися КТ Ge могут использоваться как основа для создания туннельно-резонансных диодов, работающих при комнатной температуре.

Список литературы

- [1] V. Ioannou-Sougleridis, V. Tsakiri, A.G. Nassiopoulov, P. Photopoulos, F. Bassani, Arnaud D'Avitaya. *Phys. Stat. Sol. (a)* **165**, 97 (1998).
- [2] Y. Inoue, A. Tanaka. *J. Appl. Phys.* **86**, 3199 (1999).
- [3] A.I. Yakimov, A.S. Derjabin, L.V. Sokolov, O.P. Pchelyakov, A.V. Dvurechenskii, M.M. Moiseeva, N.S. Sokolov. *Appl. Phys. Lett.* **81**, 3, 499 (2002).
- [4] U. Meirav, E.B. Foxman. *Semicond. Sci. Technol.* **10**, 255 (1995).
- [5] A.V. Dvurechenskii, A.V. Nenashev, A.I. Yakimov. *Nanotechnology* **13**, 75 (2002).