

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



Национальный исследовательский
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Т Р У Д Ы **ЧЕТЫРНАДЦАТОЙ** **ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ** **СТУДЕНЧЕСКИХ** **НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ** **ИНКУБАТОРОВ**

Томск, 17–18 мая 2017 г.



ТОМСК
«Издательство НТЛ»
2017

Оптоэлектронные элементы на основе материальной системы кремний – германий с квантовыми точками германия

Н.С. Кравцова, Н.В. Вагин, М.Е. Габидулин

*Научный консультант – докт. физ.-мат. наук **А.П. Кокханенко**,
Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

_natashka_96@mail.ru, kokh@mail.tsu.ru

В последние годы исследователи проявляют очень большой интерес к созданию различных оптоэлектронных устройств на основе материала с квантовыми точками (КТ) германия на кремнии [1]. Такими приборами могут быть фотоприемники инфракрасного диапазона, транзисторы и фотодиоды. К преимуществам данной материальной системы можно отнести продление спектрального отклика в инфракрасную область по сравнению с чистым кремнием, относительную дешевизну, безвредность для здоровья человека и работу в широком температурном интервале. Такого типа наногетероструктуры обладают рядом свойств: увеличение времени жизни носителей, снижение скорости тепловой генерации и чувствительность к нормально падающему излучению.

Основная часть

В настоящее время наиболее перспективный метод формирования массива квантовых точек основан на эффектах самоорганизации полупроводниковых наноструктур в гетероэпитаксиальных системах.

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) по существу является наиболее развитой до совершенства технологией вакуумного напыления тонких пленок. Ее отличие от классической технологии вакуумного напыления связано с более высоким уровнем контроля технологического процесса. В методе МЛЭ тонкие монокристаллические слои формируются на нагретой монокристаллической подложке за счет реакций между молекулярными или атомными пучками и поверхностью подложки. Успех процесса эпитаксии зависит от соотношения между параметрами решетки пленки и подложки, правильно выбранных соотношений между интенсивностями падающих пучков и температуры подложки.

Метод Странского – Крастанова представляет собой промежуточный механизм роста, который лежит в основе формирования полупроводни-

ковых квантовых точек (рис. 1). Он заключается в том, что сначала на поверхности идет рост по послойному механизму, затем после образования смачивающего слоя (толщиной один или несколько монослоев) происходит переход к островковому механизму роста. После завершения формирования двумерного слоя идет рост трехмерных островков.

Существуют проблемы при создании быстродействующих транзисторов, и все основные усилия направлены на формирование в канале транзистора квантовых точек. Это позволяет в полной мере реализовать преимущества квантовых и одноэлектронных эффектов, таких, как туннелирование, размерное квантование энергетического спектра носителей заряда. Для того чтобы обеспечить работу квантового транзистора при комнатной температуре, необходимо, чтобы размеры КТ не превышали 10 нм. Наилучшие результаты получены в Японии на структуре кремний-на-изоляторе (КНИ) [3]. В итоге удалось получить одноэлектронный кремниевый транзистор, в котором модуляция тока достигала 100 % уже при $T = 77$ К (рис. 2).

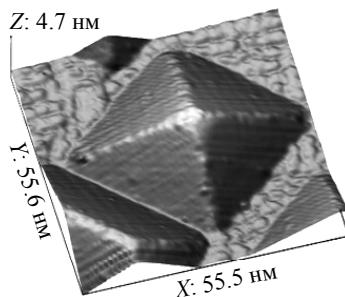


Рис. 1. Изображение квантовой точки германия на поверхности кремния [2]

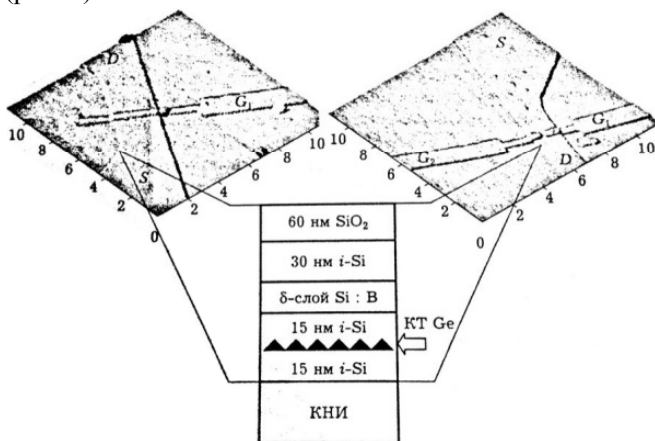
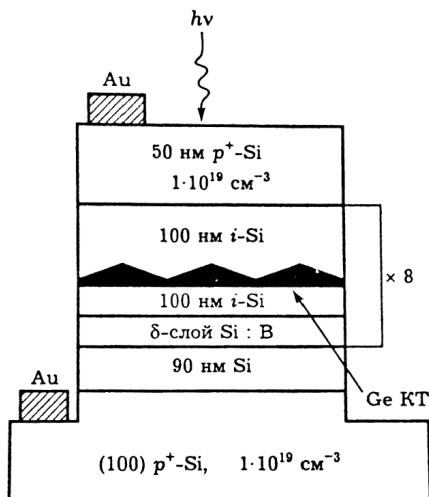


Рис. 2. Схематическое изображение полевого транзистора с полосковым затвором [3]

- 1) прибор работает при нормальном падении света без применения дополнительных решеток и отражателей;
- 2) большая величина силы осциллятора;
- 3) большое время жизни фотовозбужденных носителей заряда ($>10-11$ с);
- 4) высокая рабочая температура фотодетектора.



Кремний прозрачен для фотонов с длиной волны больше 1.1 мкм. Хорошей чувствительностью в области ~ 1.5 мкм обладают германиевые ФП. В связи с этим возникает проблема создания гетероструктур Ge/Si, фоточувствительных при комнатной температуре в диапазоне те-

лекоммуникационных длин волн 1.3–1.5 мкм. Осуществляли осаждение объемных слоев Ge на Si [5], либо выращивали многослойные напряженные сверхрешетки $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$. Критерием оценки качества ФП служит квантовая эффективность и темновой ток при напряжении 1В. При длине волны $\lambda = 1.3$ мкм, в условиях нормального падения света на приемник, квантовая эффективность ФП $\eta = 1\text{--}4.2\%$. При засветке торца планарных волноводов, сформированных на той же кремниевой подложке, квантовая эффективность может достигать $\eta = 11\%$. Несмотря на относительно высокое значение квантовой эффективности, темновые токи оказались слишком велики. Было решено заменить сплошные слои GeSi-слоями германиевых квантовых точек. Была достигнута квантовая эффективность $\eta = 2.3\%$ при $\lambda = 1.3$ мкм и плотность темнового тока $J = 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$. В [6] рассказывается о создании Si $p\text{--}i\text{--}n$ -диодов с нанокластерами Ge (рис. 4), в которых квантовая эффективность достигала 8 %, а темновой ток – рекордно низкого значения $I = 3 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$.

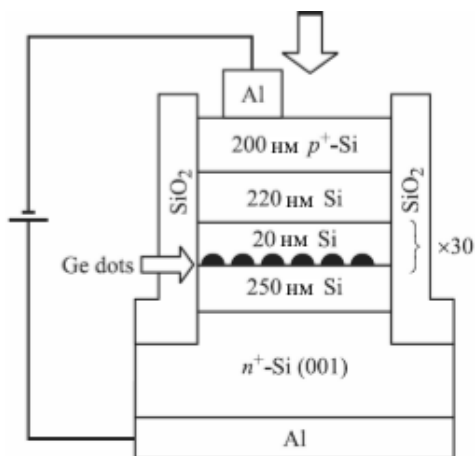


Рис. 4. Схематическое изображение поперечного сечения кремниевых $p\text{--}i\text{--}n$ -фотодиода с квантовыми точками Ge [6]

Следовательно, стало ясно, чтобы улучшить параметры ФП, необходимо уменьшить размеры КТ до величин 10 нм и одновременно увеличить слоевую плотность КТ, чтобы добиться минимальных значений темного тока без потерь квантовой эффективности фотопреобразования.

Таким образом, проведен обзор результатов по разработке элементов электроники и оптоэлектроники на основе материальной системы кремний – германий с квантовыми точками германия. Показана возможность использования подобных структур для получения быстродействующих СВЧ-транзисторов и фоточувствительных структур ИК-диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пчеляков О.П., Болховитянов Ю.Б., Двуреченский А.В. и др. // ФТП. – 2000. – Т. 34. – № 11. – С. 1281.
2. Арапкина Л.В., Юрьев В. // УФН. – 2010. – Т. 180. – № 3. – С. 289–302.
3. Ishikuro H. and Hiramoto T. // Appl. Phys. Lett. – 1997. – V. 71. – P. 3691.
4. Двуреченский А.В., Якимов А.И. Гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками для нанотранзисторов, фототранзисторов и фотодиодов // Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – С. 314–328.
5. Colace L., Masini G., Assanto G., et al. // Appl. Phys. Lett. – 2000. – V. 76. – P. 1231.
6. Tong S., Wan J. L., and Wang K. // Appl. Phys. Lett. – 2002. – V. 80. – P. 1189.