

ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ БУФЕРНЫЙ СЛОЙ В ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ

Бондаренко В.П.* , Троянова Г.Н.* , Левченко В.И.** , Постнова Л.И.**

* Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013 Минск, ул. П.Бровки 6

** Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси
220072 Минск, ул. П.Бровки 17

Пористый кремний (ПК) образуется в результате электрохимического анодирования монокристаллического кремния во фтористоводородной кислоте. Несмотря на наличие пор, пористый кремний сохраняет совершенную структуру монокристалла кремния, и при этом механическими свойствами ПК можно управлять, изменяя его пористость. Это свойство позволяет использовать ПК в качестве буферного слоя, компенсирующего напряжения в гетероэпитаксиальных структурах. В настоящей работе представлен анализ современного состояния исследований гетероэпитаксиальных слоев (ГЭС) на пористом кремнии.

Первая теоретическая работа, в которой пористый кремний рассматривается как буферный слой для получения высококачественных ГЭС, опубликована в 1986 году [1]. В 1987 году появляются первые статьи с результатами экспериментальных исследований слоев CoSi_2 и GaAs на ПК. К настоящему времени установлено, что пористый кремний обеспечивает получение качественных ГЭС самых различных материалов (алмаз, GaN, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, Ge, GaAs, GaP, AlGaAs, PbS, PbTe, InSb) на кремниевой подложке. Несоответствия параметров решетки для этих ГЭС и кремния варьируются в очень широких пределах от - 40% до + 40%. Использование ПК позволяет улучшить структурное совершенство практически всех исследованных ГЭС. Их структура, как правило, неоднородна: кристаллическое совершенство улучшается в направлении от границы раздела с ПК к поверхности ГЭС [2-6]. Слой ПК облегчает зародышеобразование алмазных пленок, улучшает их адгезию [3]. Он позволяет формировать на кремниевых подложках толстые ГЭС, которые при отсутствии пористого слоя отслаиваются от подложки из-за высоких механических напряжений, возникающих при нагреве-охлаждении. Во многих работах отмечается большое влияние, оказываемое на качество ГЭС пористой поверхности. Однако, систематические исследования влияния структурных параметров пористого слоя на качество ГЭС, а также разработка оптимальных методов очистки практически отсутствуют.

Все известные методы формирования ГЭС на пористом кремнии могут быть разделены на две группы.

В первой группе вначале на поверхности ПК формируют тонкий сплошной слой кремния или AlN, а затем осаждают ГЭС. Сплошной слой изолирует растущий эпитаксиальный слой от загрязнений и окисных включений, которые находятся в порах, и, тем самым, позволяет снизить требования к степени очистки пористой поверхности перед эпитаксией. Таким способом были получены гетероэпитаксиальные слои CoSi_2 , GaN, GaAs, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, AlGaAs, GaP на кремнии. Чтобы объяснить положительное влияние, оказываемое пористым буферным слоем на структуру ГЭС, предложена модель, основанная на положении о том, что обычно используемые для гетероэпитаксии подложки слишком толстые (по сравнению с осаждаемой пленкой), чтобы быть эластичными. Если толщины подложки и пленки сравнимы, то напряжения в структуре распределяются более равномерно. В качестве «универсальной гибкой подложки» для формирования бездефектных ГЭС предложена структура, содержащая сплошной тонкий (с толщиной, не превышающей критическое значение) кремниевый слой, слой ПК и подложку. Пористый кремний ослабляет

механическую связь между сплошным слоем и Si подложкой. Для изготовления такой структуры помимо технологии сращивания, может быть использовано эпитаксиальное осаждение Si на пористый кремний или спекание поверхности ПК путем отжига в водороде.

Во второй группе на начальном этапе роста происходит заполнение пор компонентами наращиваемого гетероэпитаксиального слоя. При этом формируется композитный буферный слой, обеспечивающий релаксацию напряжений, связанных с рассовмещением решеток подложки и гетероэпитаксиального слоя. Поскольку композитный слой, как правило, формируется только в верхней части пор, он также может рассматриваться как аналог тонкого сплошного слоя в «универсальной гибкой подложки». Теоретический анализ механических напряжений (на примере GaAs/ПК/Si) в структурах с композитным буферным слоем на основе ПК проведен в работе [5]. Предполагалось, что параметр решетки буферного слоя являются суперпозицией параметров решетки кремния (с учетом его пористости) и GaAs. Наличие упругой деформации в многослойных ГЭС характеризуется тем, что напряжения существуют в каждом слое и под действием этих напряжений структура изгибается. Величина радиуса изгиба может служить оценкой уровня напряжений в ГЭС. Анализ показал, что для каждой пористости существует оптимальный диапазон толщин ПК, при которых напряжения в гетероструктуре минимальны. Результаты моделирования были подтверждены экспериментально для структур GaAs/ПК/Si и C/ПК/Si [3-5].

Таким образом, при изготовлении гетероэпитаксиальных структур пористый кремний может быть использован для ослабления механической связи между тонким буферным слоем и Si подложкой или как основа для формирования композитного буферного слоя, улучшающего адгезию и уменьшающего механические напряжения. Использование первого подхода позволяет снизить требования к степени очистки пористой поверхности. С помощью этого подхода удалось вырастить на кремниевых подложках качественные гетероэпитаксиальные слои CoSi_2 , GaN, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, GaP, AlGaAs, GaAs. Второй подход, несмотря на большую сложность, имеет очевидное преимущество при выращивании на кремнии гетероэпитаксиальных пленок с очень высоким несоответствием параметров решетки и термических коэффициентов, таких как алмаз, PbS [7], PbTe [8], InSb. Пористый кремний в этих структурах облегчает зародышеобразование, улучшает адгезию слоев, повышает их прочность при термических воздействиях.

Литература

1. S. Luryi and E. Suhir. Appl. Phys. Lett. **49**, 140 (1986).
2. Y. Kao, K. Wang, B. Wu, T. Lin, C. Nien, D. Jamieson. Appl. Phys. Lett. **51**, 1809 (1987).
3. V. Raiko, R. Spitzl, V. Borisenko, V. Bondarenko. Diamond and Rel. Mater. **5**, 1063 (1996).
4. Т. Ковязина, А. Кутас, В. Хитко, Р. Гайдук, Ф. Комаров, В. Солдов'ев, В. Бондаренко, Г. Троянова. Materials Science Forum **143-147**, 583 (1994).
5. N. Sobolev, G. Troyanova, V. Bondarenko, Т. Kovyazina. International Conference "Porous Semiconductors: Science and Technology". Mallorca, Spain (1998). P.135.
6. В. Бондаренко, Н. Ворозов, В. Дикарева, А. Дорофеев, В. Левченко, Л. Постнова, Г. Н. Троянова. Письма в ЖТФ **20**, 51 (1994).
7. V. Yakovtseva, N. Vorozov, L. Dolgyi, V. Levchenko, L. Postnova, M. Balucani, V. Bondarenko, G. Lamedica, V. Ferrara, A. Ferrari. Phys. Stat. Sol. (a) **182**, 195 (2000).
8. S. Zimin, M. Preobrazhensky, D. Zimin, R. Zaykina, G. Borzova, V. Naumov. Infrared Physics and Technology **40**, 337 (1999).