

05;06

Механизм релаксации напряжений несоответствия при эпитаксиальном росте GaN на пористом SiC

© М.Г. Мынбаева, О.В. Константинов, К.Д. Мынбаев,
А.Е. Романов, А.А. Ситникова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: mgm@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 мая 2006 г.

Обнаружено явление снижения плотности проникающих дислокаций при эпитаксиальном наращивании слоев GaN на подложке пористого SiC хлорид-гидридным методом. Предложено, что на ранних стадиях роста пористая подложка способна перераспределять напряжения в формирующейся гетеро-структуре. Это приводит к реализации специфичного механизма релаксации напряжений через генерацию „сверхрешетки“ плоскостных дефектов. На дальнейших стадиях роста эти дефекты препятствуют прорастанию дислокаций, что для слоев GaN толщиной $1\ \mu\text{m}$ позволяет снизить плотность дислокаций на два порядка по сравнению со слоями, выращенными на непористой подложке.

PACS: 81.05.Ea, 61.72.Ff, 61.72.-y

Несоответствие параметров решеток подложки и слоя при гетероэпитаксии полупроводников обуславливает возникновение в гетеро-структуре механических напряжений. Релаксация этих напряжений сопровождается изменением упругонапряженного состояния и дефектной структуры в пленке и подложке.

В настоящей работе сообщается о наблюдении феномена самоорганизации дефектной структуры, вызванного релаксацией напряжений несоответствия в системе подложка/слой. Это явление — формирование плоскостных дефектов, наблюдающееся на ранних стадиях эпитаксиального наращивания GaN на подложку пористого SiC. Обнаруженное явление приводит к существенному уменьшению плотности проникающих дислокаций в эпитаксиальном слое (ЭС) по сравнению со слоями, выращенными на непористых подложках.

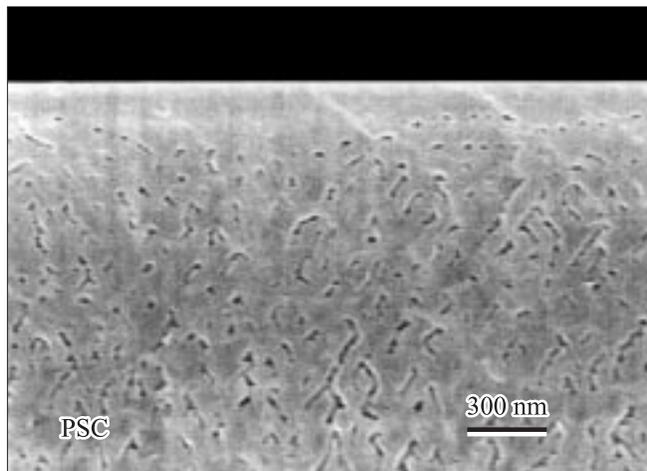


Рис. 1. Изображение поперечного среза подложки пористого карбида кремния (ПКК), полученное методом сканирующей электронной микроскопии.

Пористый карбид кремния (ПКК) был изготовлен поверхностной анодизацией пластин 6Н-SiC *n*-типа проводимости в 3%-ном водном растворе HF. Полученный пористый слой сохранял монокристаллическую структуру и стехиометрию исходного SiC. На рис. 1 представлено изображение поперечного среза образца ПКК, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Особенностью полученных слоев ПКК было наличие на поверхности беспористого монокристаллического слоя, свободного от каналов пор [1]. В соответствии с современными представлениями об эпитаксиальном росте на подложках пористого кремния большой площади, для достижения низкой плотности дефектов в выращиваемых слоях требуется низкая поверхностная пористость подложек. Как правило, ее достигают проведением перед ростом специальных процедур, „закрывающих“ каналы пор на поверхности [2]. Присутствие на поверхности использованных нами подложек ПКК плотного слоя, не содержащего пор, можно рассматривать как их преимущество.

Эпитаксиальное наращивание слоев GaN в ориентации (0001), толщиной 1 μm , проводилось на пористых и непористых подложках

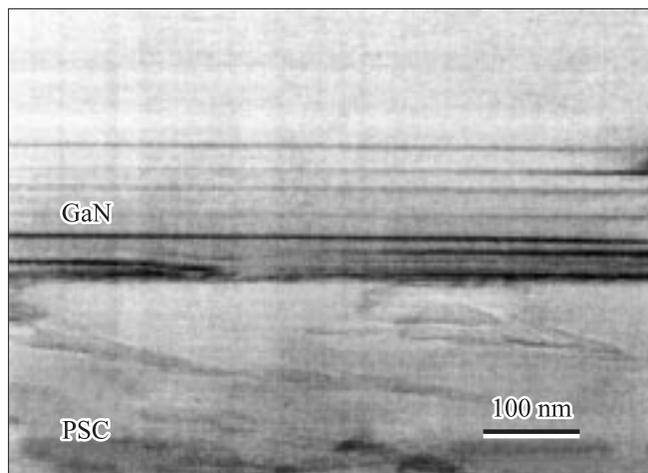


Рис. 2. Структура плоскостных дефектов в слое GaN вблизи границы раздела подложка/слой (просвечивающая электронная микроскопия).

хлорид-гидридным методом (ХГМ) [3]. Исследования ЭС GaN проводились методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Отличительной особенностью ЭС, выращенных на ПСК, было наличие плоскостных дефектов, расположенных в базисной плоскости (0001) вдоль границы раздела подложка/слой. Общая плотность проникающих дислокаций (ПД) при этом снизилась с величины 10^{10} cm^{-2} , характерной для слоев, выращенных на непористом SiC, до 10^8 cm^{-2} в ЭС, выращенных на ПСК.

На рис. 2 представлено изображение, полученное методом ПЭМ на поперечном срезе образца GaN/ПСК вблизи границы раздела подложка/слой. Параллельные линии, наблюдаемые на изображении, представляют собой плоскостные дефекты ЭС GaN, сформировавшиеся в области толщиной 200 nm, прилежащей к гетерогранице. Исследование области, содержащей плоскостные дефекты, методом селективной микродифракции выявило наличие субструктуры, аналогичной сверхрешетке с периодом 16 nm [4]. Одновременно были обнаружены изменения в объемной морфологии пористой структуры подложки. При этом наблюдавшаяся в данном случае модификация структуры ПСК суще-

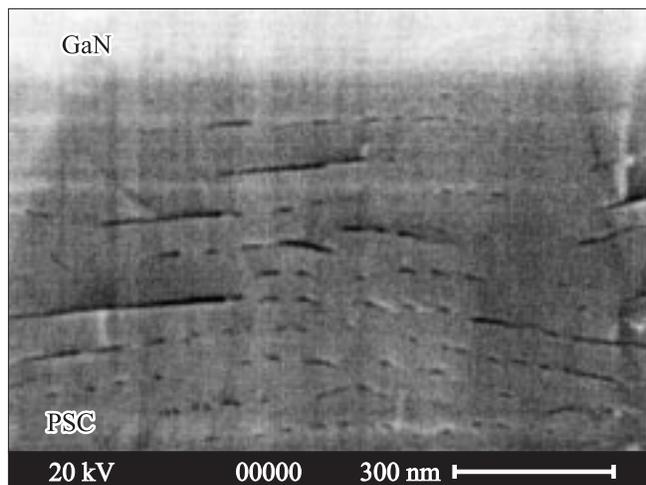


Рис. 3. Трансформация пор в подложке пористого карбида кремния (ПКК) в результате релаксационных процессов (сканирующая электронная микроскопия).

ственно отличалась от модификации, которая наблюдается в результате его термической обработки, когда пористая структура канального типа трансформируется в структуру, содержащую замкнутые ограниченные поры [5]. На рис. 3 представлен пример изображения поперечного скола структуры GaN/ПКК, полученного методом СЭМ. Как видно из рисунка, каналы пор, сформировавшиеся при анодизации (см. рис. 1), трансформировались в несплошности, подобные микротрещинам длиной от 0.2 до 0.5 μm . Подобная трансформация пористой структуры подложки может быть приписана эффекту возникновения неустойчивости формы микрополости в упругой среде под воздействием внешней нагрузки (см., например, [6]). В связи с этим экспериментально наблюдаемые нами изменения формы пор в подложке ПКК могут рассматриваться как свидетельство факта перераспределения напряжений несоответствия между пористой подложкой и ЭС GaN.

Прежде чем перейти к обсуждению специфики дефектообразования в ЭС GaN, выращенных на ПКК, заметим, что общие представления о дефектообразовании в ЭС, выращенных гетероэпитаксией, заключа-

ются в следующем. На начальном этапе эпитаксии в растущем ЭС возникает однородная упругая деформация и происходит накопление упругой энергии пропорционально толщине слоя [7]. В случае толстых сплошных (не пористых) подложек все упругие искажения сосредоточены в ЭС. По мере увеличения толщины наращиваемого слоя избыток свободной энергии высвобождается (наступает релаксация) посредством образования дефектов кристаллической структуры, — преимущественно дислокаций несоответствия на границе ЭС/подложка и связанных с ними ПД в объеме ЭС. Очевидно, что данный механизм реализуется в случае роста GaN на сплошной (непористой) подложке SiC, приводя к высокой (10^{10} cm^{-2}) плотности ПД в ЭС.

Наблюдаемые особенности дефектной структуры слоев GaN, выращенных на ПКК, дают основания полагать, что в данном случае упругая энергия формирующейся гетероструктуры эффективно понижается посредством энергетических затрат на деформацию пористой структуры подложки. Этот механизм соответствует перераспределению напряжений несоответствия между гетероэпитаксиальным слоем и пористой подложкой. Идея о возможности реализации иного механизма релаксации напряжений несоответствия при гетероэпитаксии на податливых („compliant“) подложках, в том числе на пористой кремниевой подложке, высказывалась, например, в [8–10]. В нашем случае специфика релаксации напряжений несоответствия при гетероэпитаксии GaN на ПКК проявилась в формировании сверхрешетки плоскостных дефектов.

Хорошо известно, что плоскостные дефекты являются характерными для материалов с плотнейшей упаковкой. В частности, плоскостные дефекты появляются вследствие релаксации упругих напряжений посредством кооперативных сдвигов плотноупакованных слоев структуры, приводящих к возникновению новой кристаллической фазы в областях накопления упругих деформаций [11]. Таким образом, можно ожидать, что в гетероструктуре GaN/ПКК формирование в ЭС сверхрешетки плоскостных дефектов, расположенных в плоскости (0001), есть следствие упругой релаксации напряжений несоответствия, происходящей на ранних стадиях наращивания.

Уменьшение плотности проникающих дислокаций в слоях GaN, выращенных на ПКК, мы связываем с подавлением их распространения „сверхрешеткой“ плоскостных дефектов на стадии пластической релаксации. Можно полагать, что наличие „сверхрешетки“ служит барьером, препятствующим проникновению ПД в растущий ЭС. Этот

выход хорошо согласуется с известными экспериментальными данными, показывающими, что наличие напряженной „сверхрешетки“ может существенно снизить плотность ПД в слоях GaN, выращиваемых различными методами (см., например, [12,13]). В напряженных „сверхрешетках“ снижение плотности дислокаций достигается за счет их загиба и увеличения вероятности реакций аннигиляции между ними. В нашем случае наличие новой фазы или внутренних границ в области ЭС GaN, содержащей плоскостные дефекты, также может привести к изменению траекторий ПД (их отклонению от направления [0001]) и в конечном итоге к дополнительным реакциям между ними.

В заключение еще раз отметим, что благодаря специфике релаксации напряжений в гетероструктурах GaN/ПНК было достигнуто уменьшение на два порядка (до 10^8 см^{-2}) плотности проникающих дислокаций в ЭС толщиной $1 \mu\text{m}$ по сравнению с аналогичными слоями, выращенными на непористом SiC. Согласно литературным данным, при использовании ХГМ на сплошной гетероподложке данная величина достижима при наращивании слоев GaN толщиной свыше $50 \mu\text{m}$ [14].

Авторы выражают благодарность Д.В. Цветкову и О.В. Ледяеву за проведение процессов эпитаксии.

Работа была выполнена при поддержке гранта NICOP N 00014-01-1-0828 и проекта РФФИ 05-02-177781-а.

Список литературы

- [1] Мынбаева М.Г., Бауман Д.А., Мынбаев К.Д. // ФТТ. 2005. Т. 47. С. 1571.
- [2] Sato N., Sakaguchi K., Yamagata K., Fujiyama Y., Nakayama J., Yonehara T. // Jap. J. Appl. Phys. 1996. V. 35. P. 973.
- [3] Nikolaev A.E., Nikitina I., Zubrilov A., Мынбаева М., Melnik Yu., Dmitriev V. // MRS Int. Journ. Nitride Semicond. Res. 2000. V. 5S1. P. W6.
- [4] Мынбаева М., Ситникова А., Трезубова А., Заморянская М., Ледяев О., Мынбаев К. // Тез. докл. 4-й Всерос. конференции „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“, СПб., 2005. С. 82.
- [5] Мынбаева М., Lavrent'ev A., Kotousova I., Volkova A., Мынбаев К., Lebedev A. // Mater. Sci. Forum. 2005. V. 483-485. P. 269.
- [6] Вакуленко А.А., Кукушкин С.А. // ФТТ. 1998. Т. 40. С. 1259.
- [7] Romanov A.E. // Z. Metallkd. 2005. V. 96. N 5. P. 455.

- [8] *Lo Y.H.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. P. 2311.
- [9] *Romanov S.I., Mashanov V.I., Sokolov L.V., Gutakovskii A., Pchelyakov O.P.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 4118.
- [10] *Romanov A.E., Speck J.S.* // J. Electron. Mater. 2000. V. 29. P. 901.
- [11] *Николин Б.И.* // Многослойные структуры и политипизм в металлических сплавах. Киев: Наук. думка, 1984.
- [12] *Gong J.R., Huang C.W., Tseng S.F., Lin T.Y., Lin K.M., Liao W.T., Tsai Y.L., Shic B.H., Wang C.L.* // J. Cryst. Growth. 2004. V. 260. P. 73.
- [13] *Wang H.M., Zhang J.P., Chen C.Q., Fareed Q., Yang J.-W., Asif Khan M.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 604.
- [14] *Morkoç H.* // Mater. Sci. Eng. R. 2001. V. 33. P. 135.