

06;07;12

Фотоиндуцированная самоорганизация галлиевых нанопроволок на поверхности GaN

© Д.А. Бедарев, С.О. Когновицкий, В.В. Лундин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 18 января 1999 г.

Выявлен механизм ультрафиолетовой лазерной абляции эпитаксиальных слоев GaN, в основе которого лежит диссоциация молекул GaN с образованием азотосодержащей летучей компоненты. Определены условия экспонирования, при которых происходит образование галлиевых нанокластеров на поверхности GaN. Найдены режимы эпитаксиального роста GaN, при которых происходит формирование параллельных микротеррас на поверхности образцов. На поверхности выращенных образцов с микротеррасами обнаружено образование галлиевых нанопроволок под воздействием мощного ультрафиолетового излучения. Предложено использовать описанные явления при разработке новых методик оптической ультрафиолетовой литографии и при создании оптоэлектронных приборов на основе GaN.

Исследования эффектов самоорганизации наноструктур на поверхности полупроводников имеют большое значение для современной оптоэлектроники и уже привели к созданию полупроводниковых лазеров на квантовых точках состава A_3B_5 и A_2B_6 , полученных с использованием режима субмонослойного роста [1,2]. Возможность формировать упорядоченные структуры из этих материалов на разориентированных подложках позволяет эффективно влиять на их оптические поляризационные и спектральные свойства.

Новым перспективным материалом для создания светоизлучающих приборов в коротковолновой видимой спектральной области является GaN [3]. Однако процессы самоорганизации в материале GaN, приводящие к необходимой модификации его оптических свойств, в настоящее время изучены недостаточно. В данной работе предложен новый эффективный метод формирования под воздействием излучения

эксимерного лазера упорядоченного массива параллельных галлиевых нанопроволок на слабо корругированной поверхности GaN.

Исследовавшиеся эпитаксиальные слои GaN выращивались методом эпитаксии из металлоорганических соединений на сапфированных подложках ориентации $(0001) \pm 30'$ [4]. Процессы проводились в горизонтальном реакторе, в потоке водорода при пониженном давлении 200 mbar. В качестве источников использовались аммиак и триметилгаллий. Для получения слоев, легированных магнием, использовался бисциклопентадиенил магния.

Эпитаксиальный процесс включал в себя осаждение буферного слоя GaN при пониженной температуре ($\sim 500^\circ\text{C}$), отжиг буферного слоя с последующим эпитаксиальным ростом основного слоя или многослойной структуры при высокой температуре ($\sim 1000\text{--}1040^\circ\text{C}$). Во время эпитаксиального роста поток триметилгаллия составлял $36 \mu\text{mole}/\text{min}$, что соответствовало скорости эпитаксиального роста $2.6\text{--}2.8 \mu/\text{h}$.

Нелегированные эпитаксиальные слои, выращенные при температурах эпитаксиального роста 1040°C , были атомно-гладкими по данным атомно-силовой микроскопии, непланарность поверхности не превышала 1 nm, что свидетельствует о двумерном характере эпитаксиального роста. Аналогичная морфология слоев наблюдалась также при легировании магнием с концентрацией $N_{[\text{Mg}]}$ не более $4 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$. При повышении уровня легирования или при снижении температуры эпитаксиального роста наблюдалось значительное увеличение непланарности поверхности, вплоть до образования макроскопических террас высотой порядка 100 nm.

При определенных промежуточных условиях роста в узком диапазоне параметров было обнаружено образование квазипериодического массива параллельных микроскопических ростовых ступенек на поверхности создаваемых образцов (рис. 1). Единое направление ступенек выдерживалось на площади диаметром до 5 mm. По изображениям поверхности, полученным при помощи атомно-силовой микроскопии, было определено, что средний период повторения ступенек составлял около 200 nm, а высота ступенек — 6 nm.

Полученные образцы GaN, в том числе со слабо корругированной поверхностью, были подвергнуты на воздухе воздействию излучения эксимерного лазера с длиной волны 248 nm. Экспонирование осуществлялось однократным импульсом длительностью 10 ns и энергией

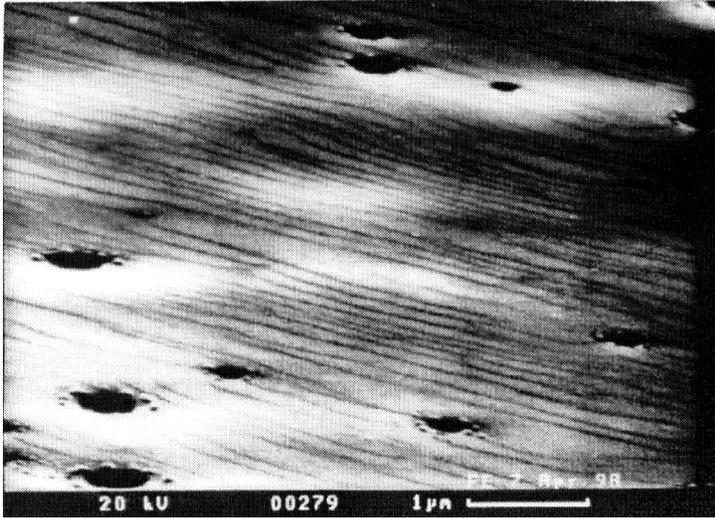


Рис. 1. Изображение поверхности образца GaN с квазипериодическими микро-террасами, полученное при помощи сканирующей электронной микроскопии.

около 80 мДж. Распределение интенсивности по поперечному сечению сфокусированного лазерного пучка было близко к гауссовому.

В результате исследования было обнаружено, что для GaN характерно специфическое перераспределение продуктов фотоабляции. Воздействие мощного ультрафиолетового излучения приводит к диссоциации молекул GaN, переходу азота в газообразную фазу и осаждению металлического галлия на поверхности образца. При этом существенным образом изменяются оптические свойства поверхности, например отражение приобретает металлический характер. Обнаруженная особенность абляции GaN может эффективно использоваться при оптической ультрафиолетовой литографии.

После лазерного экспонирования центральная часть области возбуждения на поверхности образца, где плотность энергии достигала 2.1 Дж/см^2 , оказалась покрыта сплошной пленкой галлия. На периферийных участках засветки не было обнаружено модификации морфологии поверхности.

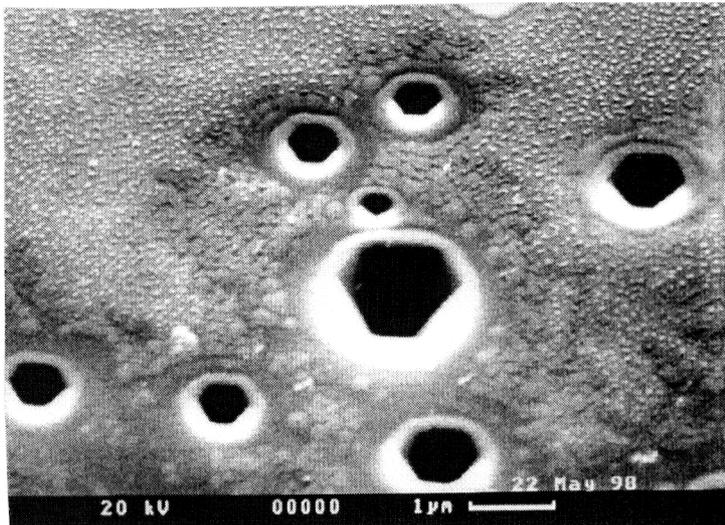


Рис. 2. Изображение планарной поверхности образца GaN после облучения эксимерным лазером, полученное при помощи сканирующей электронной микроскопии.

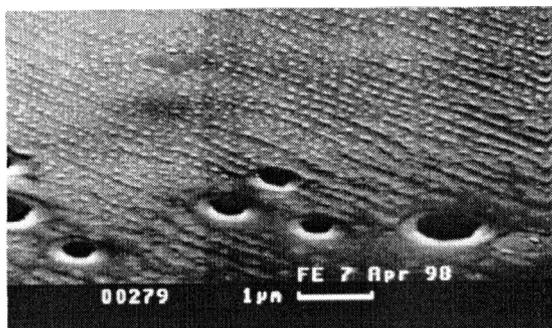


Рис. 3. Изображение поверхности образца GaN с галлиевыми проволоками, полученное при помощи сканирующей электронной микроскопии.

В области возбуждения, где плотность энергии соответствовала узкому диапазону промежуточных значений и была оценена с учетом пространственного распределения интенсивности лазерного пучка, наблюдалось образование массива изолированных галлиевых кластеров.

На образцах с планарной однородной поверхностью происходило формирование точечных кластеров с диаметром около 70 nm. Расположение этих кластеров носило хаотический характер (область поверхности в верхней части рис. 2).

Случайно расположенные галлиевые кластеры диаметром до 25 μ ранее были получены на поверхности GaAs при эпитаксиальном росте в условиях недостатка As [5]. Хаотически расположенные "магические" кластеры с размером 1–2 nm и определенным числом атомов Ga в кластере недавно были созданы на поверхности Si (111) [6].

Использование новых образцов GaN с ростовыми микротеррасами, нарушающими однородность поверхности, позволило сформировать при указанном лазерном облучении галлиевые кластеры, преимущественно объединенные в квазипериодическую систему параллельных металлических проволок (рис. 3). Эти проволоки локализованы вдоль ростовых ступеней, что обусловлено, по-видимому, большей скоростью фотоабляции и перераспределением сил поверхностного натяжения в окрестности ступенек. Диаметр поперечного сечения проволоки составлял около 50 nm.

Таким образом, на поверхности GaN впервые создана самоорганизующаяся система ориентированных металлических нанопроволок с малым периодом чередования, представляющая собой уникальный объект для исследования плазмон-поляритонного взаимодействия в квазиодномерных структурах. Кроме того, полученная система металлических проволок может выполнять роль встроенного поляризатора для светоизлучающих приборов на основе GaN, а также использоваться в качестве полупрозрачного контакта для более равномерного распределения инжектированных носителей вдоль поверхности образца.

Авторы выражают признательность Сейсяну Р.П. и Аверкиеву Н.С. за проявленный интерес к работе, Бусову В.М. за обеспечение исследования морфологии поверхности образцов с помощью высокоразрешающей сканирующей электронной микроскопии, Крыжановскому А.К. за проведение исследования морфологии поверхности образцов с помощью атомно-силовой микроскопии.

Список литературы

- [1] *Ledentsov N.N., Schukin V.A., Grundmann M., Kirstaedter N., Bohrer J., Schmidt O., Bimberg D., Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Kop'ev P.S., Zaitsev S.V., Alferov Zh.I., Borovkov A.I., Kosogov A.O., Ruvimov S.S., Werner P., Gosele U.* // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 8743–8750.
- [2] *Ivanov S.V., Toropov A.A., Shubina T.V., Sorokin S.V., Lebedev A.V., Sedova I.V., Kop'ev P.S., Pozina G.R., Bergman J.P., Monemar B.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. P. 3168.
- [3] *Akasaki I., Amano H.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. V. 36. P. 5393–5408.
- [4] *Lundin W.V., Usikov A.S.* et al. // Optical and electrical properties of III-N structures grown by MOCVD on sapphire substrates; EW MOVPE VII, Berlin, 8–11 June 1997, Workshop Booklet, F10.
- [5] *Lowes T.D., Zinke-Allmang M.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 73 (10). P. 4937–4941.
- [6] *Lai M.Y., Wang Y.L.* // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81 (1). P. 164–167.