

07:08

Эпитаксия GaN в полуполярном направлении на подложке Si(210)

© В.Н. Бессолов, Е.В. Коненкова, С.А. Кукушкин, В.И. Николаев,
А.В. Осипов, Ш. Шарофидинов, М.П. Щеглов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург
ООО „Совершенные кристаллы“, Санкт-Петербург
E-mail: bes@triat.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 9 октября 2012 г.

Излагается идея нового технологического метода выращивания слоев нитрида галлия в полуполярном направлении газофазной эпитаксией в хлоридной системе (HVPE). В качестве подложки предложен Si(210), а в качестве буферных слоев использованы: в начале — 3C-SiC, а затем — AlN. Впервые экспериментально показано, что в условиях анизотропной деформации гетероструктуры GaN/AlN/3C-SiC/Si(210) происходит рост GaN-слоя в полуполярных направлениях.

Структуры на основе нитрида галлия играют важную роль при создании приборов коротковолновой оптоэлектроники. В настоящее время такие структуры преимущественно выращивают на подложках Al₂O₃ и SiC, но в последнее время проявляется интерес к получению нитрид-галлиевых структур и на кремнии. Это обусловлено перспективами интеграции нитрид-галлиевой и кремниевой электроники, возможностью использования подложек больших (до 300 mm) размеров, их низкой стоимостью, хорошей электрической и тепловой проводимостью. Как известно, эпитаксиальный рост слоев нитрида галлия на кубическом Si(111) происходит в направлении C-оси гексагонального кристал-

ла, и такой слой, как правило, обладает значительным внутренним электрическим полем из-за пьезоэлектрической и спонтанной поляризации электронов, что играет отрицательную роль в работе светоизлучающих приборов. В связи с этим в последние годы исследователи проявляют интерес к изучению свойств нитрида галлия, выращенного как в неполярных, так и в полуполярных направлениях. Полуполярный нитрид галлия, как правило, выращивают методами газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) и молекулярно-пучковой эпитаксии (MBE) на подложках $m\text{-Al}_2\text{O}_3$ [1], $4H\text{-SiC}$ (11 $\bar{2}0$) [2] и на фасетированных поверхностях Si(113) [3] и Si(100) [4]. В последнее время появились работы по получению методом MOCVD полуполярного нитрида галлия на Si(100) с использованием промежуточного слоя 3C-SiC [5] и методом HVPE с использованием наноструктурированного слоя AlN [6].

Данная работа направлена на разработку методом HVPE технологии полуполярных толстых слоев нитрида галлия, выращенных на кремниевой подложке. В основу подхода положена идея эпитаксии вюрцитных кристаллов нитрида галлия на подложке Si(210) с тонкими буферными слоями 3C-SiC и AlN.

Для выяснения картины формирования эпитаксиального слоя GaN и оценки качества получаемых полупроводниковых структур использовались методы оптической и сканирующей электронной (SEM) микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. При рентгеноструктурном анализе структур регистрировались дифракционные пики в рефлексах либо (0004), либо (1124).

Для снижения уровня деформации в слое нитрида галлия вначале методом твердофазной гетероэпитаксии, предложенным в [7], на подложке Si(210) выращивался тонкий зародышевый слой 3C-SiC. В этом методе карбид кремния являлся продуктом химической реакции между кристаллическим кремнием и газообразной окисью углерода, причем формирование 3C-SiC слоя происходит не снаружи, а внутри подложки Si при очень небольшом пересыщении, так называемом химическом средстве [7], что приводит к „квазиравновесному“ росту зародышей. Согласно модели [8] при внедрении атомов углерода в кремний возникают вакансии, которые совершенно по-разному взаимодействуют с атомами углерода на плоскостях (100) и (110). Мы полагаем, что при таком методе формирования карбид-кремниевый слой поверхность подложки Si(210) структурируется в виде гетеро-

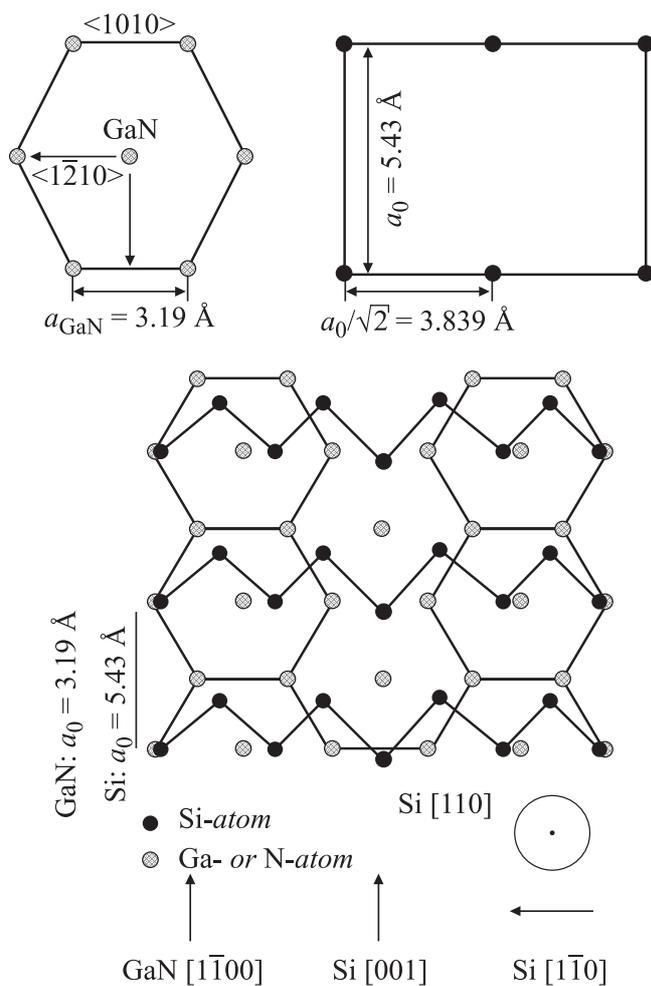


Рис. 1. Схематическое изображение решетки GaN(001) и поверхностной решетки Si(110).

структур 3S-SiC(110)/Si(110) и 3C-SiC(100)/Si(100), грани которых и образуют фасетки. Как известно, плоскость Si(110) имеет параметр

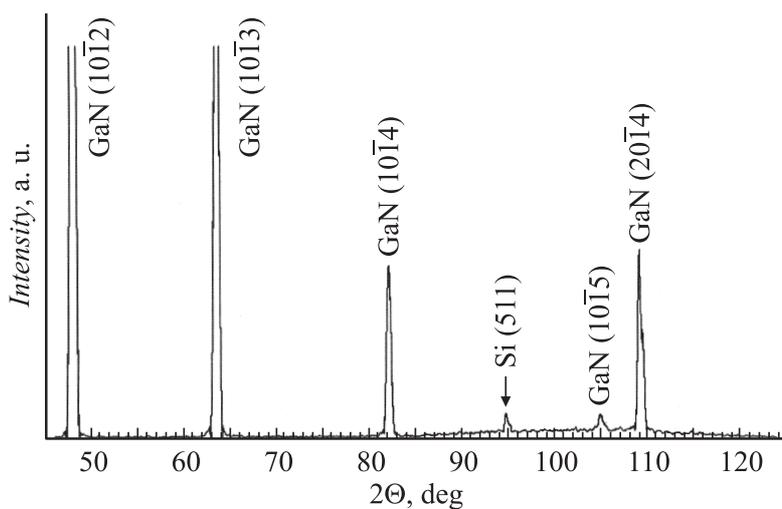


Рис. 2. Рентгеновская диффракграмма полуполярного слоя GaN.

решетки $a = 0.543$ nm в одном направлении и эффективный параметр решетки $a^* = a/2^{1/2}$ в другом (рис. 1). Аналогичная картина будет и для 3C-SiC(110).

На структуре SiC/Si методом хлоридной газофазной эпитаксии (HVPE) был выращен тонкий (~ 100 nm) слой гексагонального нитрида алюминия, а затем слой толстого (~ 10 μ m) гексагонального нитрида галлия, которые выращивались в атмосфере водорода, аналогично [4], при температурах эпитаксии слоев AlN и GaN — 950 и 1050°C соответственно.

Рентгенодифракционные исследования показали, что слой GaN по мере эпитаксиального роста кристаллизуется в виде блоков, причем ориентация поверхности слоя по мере роста меняется следующим образом: $(10\bar{1}5) \rightarrow (10\bar{1}4) \rightarrow (10\bar{1}3) \rightarrow (10\bar{1}2)$ (рис. 2).

Анализ кососимметричного рефлекса $(11\bar{2}4)$, полуширина которого составила величину 25 arcmin, позволяет утверждать об эпитаксиальном характере роста слоев.

Электронная микроскопия поверхности слоев (рис. 3) показала, что слой имеет характерную структуру слоя, выросшего в полуполярном

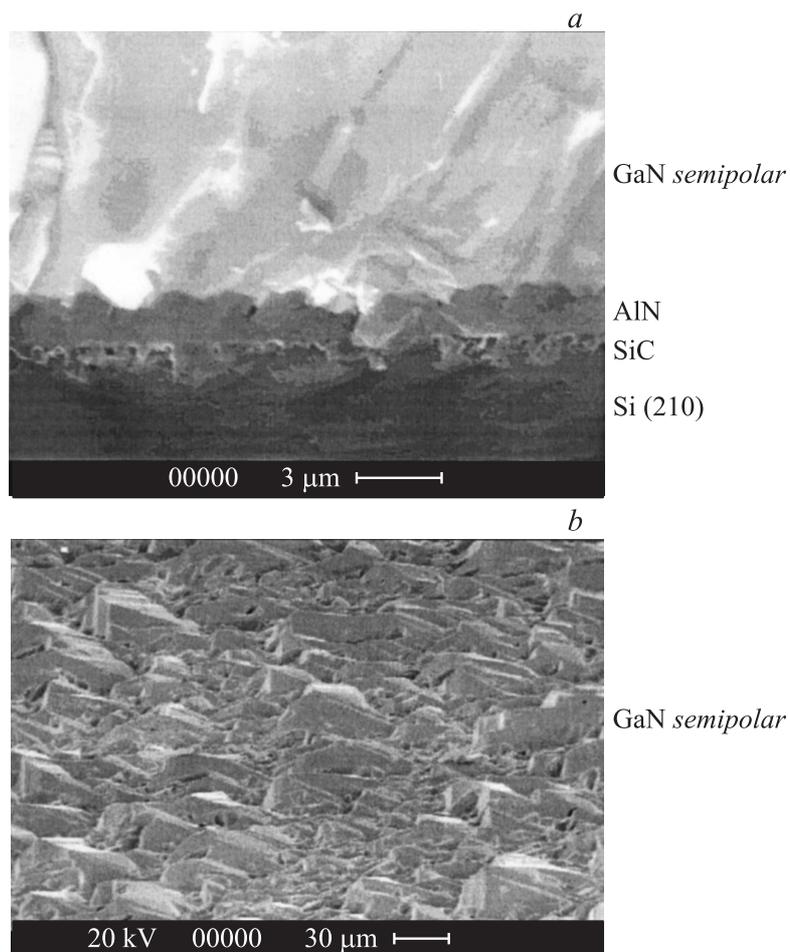


Рис. 3. SEM-изображение скола (*a*) и поверхности (*b*) структуры GaN/AlN/3C-SiC/Si(210).

направлении, подобную той, что наблюдали авторы [9] при гомоэпитаксии слоев GaN ($10\bar{1}2$) на подложке нитрида галлия, специально приготовленной для эпитаксии на плоскости (1012).

Сравнительные данные величин деформации (ε) и упругих напряжений (δ) для различных гетероструктур

| Структура | ε | σ , GPa |
|------------------------|---------------|----------------|
| GaN(1010)/3C-SiC(110) | -0.27 | 166 |
| GaN(1210)/3C-SiC(110) | 0.03 | -37 |
| GaN(0001)/3C-SiC/(100) | -0.27 | 166 |

Такое поведение слоя GaN при эпитаксии на Si(210) можно объяснить на основе модели роста слоя в условиях анизотропной деформации. Действительно, при эпитаксии слоев AlN, а затем и GaN на структурированной подложке 3C-SiC(110) и 3C-SiC(100) слои нитридов для поверхности 3C-SiC(110) испытывают анизотропную деформацию (ε_{xx} , ε_{yy}) (рис. 1) и соответствующие компоненты тензора величины упругих напряжений имеют вид [10]:

$$\sigma_{xx} = -\frac{2G}{1-\nu} (\varepsilon_{xx} + \nu\varepsilon_{yy}),$$

$$\sigma_{yy} = -\frac{2G}{1-\nu} (\varepsilon_{yy} + \nu\varepsilon_{xx}),$$

где σ_{yy} и σ_{xx} — величины напряжений вдоль $\langle 1210 \rangle$ и $\langle 1010 \rangle$ соответственно, G и ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Оценка величины деформации ε для слоев нитрида галлия, выращенных на 3C-SiC(110), показала, что в направлении $\langle 1210 \rangle$ деформация имеет знак минус (слой в состоянии растяжения), а в направлении $\langle 1010 \rangle$ — знак плюс (слой в состоянии сжатия) (см. таблицу).

Оценка величин упругих напряжений σ в гетероструктурах 3C-SiC(110)/Si(110) и 3C-SiC(100)/Si(100) и в гетероструктурах GaN(1210)/3C-SiC(110), GaN(1010)/3C-SiC(110), GaN(0002)/3C-SiC(100) показала, что величины упругих напряжений нитридных слоев σ в направлении $\langle 1010 \rangle$ в 4 раза больше, чем в направлении $\langle 1210 \rangle$ (см. таблицу). Отметим, что величина σ для структуры GaN(0001)/3C-SiC(100) равняется $\sigma_{\langle 1010 \rangle}$.

Существенно более высокая деформация нитридных слоев при росте на гранях 3C-SiC(110) в направлении $\langle 1010 \rangle$, по сравнению с деформацией в направлении $\langle 1210 \rangle$, а также рост слоя в состоянии растяжения GaN(1010)/3C-SiC(110) и сжатия GaN(1210)/3C-SiC(110)

одновременно должны приводить как к развороту слоя GaN, так и к преимущественному росту слоя в направлении меньшей деформации. По нашему мнению, наличие мозаичной поверхности карбида кремния (3C-SiC(110), 3C-SiC(100)) будет способствовать росту слоя в наиболее выгодном для него направлении. Анизотропная деформация растущего нитридного гексагонального слоя на используемой в эксперименте подложке Si(210) должна приводить к росту слоя в полуполярном направлении. Следует отметить, что возникающие анизотропные деформации при достаточно больших толщинах нитрида галлия будут приводить к пластической деформации слоев, причем этот процесс будет также способствовать смещению направления роста слоя от оси c гексагонального кристалла.

Таким образом, предложен и подтвержден новый метод эпитаксиального роста слоев нитрида галлия в полуполярном направлении в условиях анизотропной деформации растущего гексагонального нитрида слоя на подложке Si(210) с буферными слоями 3C-SiC и AlN. Установлено, что предложенный подход к выращиванию нитрида галлия в полуполярном направлении на кремниевой подложке может быть перспективен при формировании „templates“ для получения структур нитрид-галлиевой оптоэлектроники.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Российский фонд фундаментальных исследований (гранты № 10-03-00433-а, 11-02-00496-а, 11-02-12154-офи-м, 12-02-00935-а) и инновационный центр „Сколково“ (регистрационный номер № 1110023) за поддержку работ.

Список литературы

- [1] Baker T.J., Haskell B.A., Wu F., Speck J.S., Nakamura S. // Jpn. J. Appl. Phys. Part 2. 2006. V. 45. P. L154.
- [2] Wagner B.P., Reitmeier Z.J., Park J.S., Bachelor D., Zakharov D.N., Liliental-Weber Z., Davis R.F. // J. Cryst. Growth. 2006. V. 290. P. 504–512.
- [3] Tanikawa T., Hikosaka T., Honda Y., Yamaguchi M., Sawaki N. // Phys. Status Solidi. C. 2008. V. 5. P. 2966–2968.
- [4] Sawaki N., Honda Y. // Sci China-Technol. Sci. 2011. V. 54. P. 38–41.
- [5] Abe Y., Komiyama J., Isshiki T., Suzuki S., Yoshida A., Ohishi H., Nakanishi H. // Materials Science Forum. 2009. V. 600–603. P. 1281–1284.

- [6] Бессолов В.Н., Жилев Ю.В., Коненкова Е.В., Полетаев Н.К., Шарофидинов Ш., Щеглов М.П. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. С. 21–26.
- [7] Кукушкин С.А., Осипов А.В. // ФТТ. 2008. Т. 50. С. 1238–1245.
- [8] Кукушкин С.А., Осипов А.В. // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. С. 266–269.
- [9] Wei T.B., Hu Q., Duan R.F., Wei X.C., Yang J.K., Wang J.X., Zeng Y.P., Wang G.H., Li J.M. // J. Electrochem. Soc. 2010. V. 157. P. H721–H726.
- [10] Cordier Y., Moreno J.-C., Baron N., Frayssinet E., Chenot S., Damilano B., Semond F. // Phys. Status Solidi. C. 2009. V. 6. S1020–S1023.