

06;12

Новые буферные подслои для осаждения гетероэпитаксиальных пленок нитридных соединений типа A_3B_5 на сапфировых подложках

© М.И. Котелянский, И.М. Котелянский, В.Б. Кравченко

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

Поступило в Редакцию 9 июля 1999 г.

Для осаждения пленок нитридных соединений типа A_3B_5 на сапфировой подложке предлагается использовать буферный подслой из материала с кристаллической кубической структурой. Экспериментально показано, что, например, использование гетероэпитаксиального подслоя из ниобия для (0001) поверхности сапфировой подложки или подслоя из нитрида ниобия для $(11\bar{2}0)$ Al_2O_3 позволяет устранить 30° -ный разворот (0001) нитридной пленки в плоскости подложки. Устранение этого разворота значительно уменьшает рассогласование параметров решеток поверхностей подложки и нитридной пленки, что должно способствовать улучшению степени ее кристаллического совершенства. Кроме того, становятся параллельными плоскости естественного скола подложки и полупроводниковых нитридных пленок. Последнее позволяет изготавливать гетеролазер с резонатором Фабри–Перо, у которого зеркалами являются плоскости естественного скола пленок.

Одной из основных проблем создания полупроводниковых приборов на основе гетероэпитаксиальных пленок нитридных соединений типа A_3B_5 является большая ($10^{-8} - 10^{-10} \text{ cm}^{-2}$) концентрация дефектов их кристаллической структуры, которая обусловлена большим рассогласованием параметров кристаллических решеток соприкасающихся плоскостей подложки и полупроводниковой пленки. У подложек, используемых в настоящее время для выращивания гетероэпитаксиальных пленок (0001) GaN, это рассогласование составляет 16% для (0001) Al_2O_3 , 9.5% для $MgAl_2O_4$, 3.5% для SiC. При выращивании на (0001) Al_2O_3 для уменьшения влияния рассогласования параметров решеток используется гетероэпитаксиальный буферный подслой, который располагается между рабочей поверхностью подложки и нитридной полупроводнико-

вой пленкой. Этот буферный подслои изготавливается из материала с кристаллической структурой типа вюртцита: GaN, AlN либо ZnO [1].

Большое рассогласование параметров решеток при гетероэпитаксии материалов гексагональной сингонии со структурой вюртцита на поверхности (0001) Al₂O₃ связано с тем, что сопрягающиеся плоскости (0001) Al₂O₃ и (0001) нитридной пленки развернуты в плоскости подложки на 30°, так что направления $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ Al₂O₃ параллельны $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ пленки. Длина трансляции вдоль $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ Al₂O₃ равна 2.747 Å, а для, например, $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ GaN она равна 3.189 Å.

В этой работе мы предлагаем способ устранения указанного 30°-ного разворота (0001) гетероэпитаксиального A₃B₅ нитридных пленок относительно (0001) или (1120) рабочей поверхности сапфировой подложки.

Мы обратили внимание на то, что если устранить 30°-ный разворот этих плоскостей, то рассогласование станет значительно меньшим. Действительно, длина двух трансляций вдоль $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ Al₂O₃ равна 5.494 Å и практически (с точностью до 0.5%) совпадает с длиной трансляции вдоль $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ GaN, равной 5.52 Å. Длина двух трансляций вдоль $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ Al₂O₃, равная 9.52 Å, также практически (с точностью до 0.5%) равна длине трех трансляций вдоль $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ GaN.

Для устранения 30°-ного разворота мы предложили [2] использовать буферный подслои из такого материала кубической сингонии, который при гетероэпитаксии на (0001) или (1120) Al₂O₃ имеет ориентацию поверхности {111} и при этом расположенные в этой поверхности {111} направления типа $\langle 112 \rangle$ параллельны направлениям типа $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ Al₂O₃, лежащим в рабочей поверхности подложки. А у выращенной на этом буферном подслое гетероэпитаксиальной пленки со структурой вюртцита плоскость (0001) и расположенные в ней направления $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ параллельны соответственно {111} и $\langle 112 \rangle$ буферного подслоя.

То есть, если использовать буферный подслои из такого кубического материала, то можно получить следующие ориентационные соотношения:

а) (0001) Al₂O₃ // {111}_{куб.} // (0001)_{вюрт.}

б) (1120) Al₂O₃ // {111}_{куб.} // (0001)_{вюрт.}

и в обоих случаях: $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ Al₂O₃ // $\langle 112 \rangle$ _{куб.} // $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ _{вюрт.}. Буферный подслои из такого материала кубической сингонии позволяет значительно уменьшить рассогласование параметров плоских сеток соприкасающихся плоскостей, например (0001)Al₂O₃ и {111} буферного подслоя,

с одной стороны, и $\{111\}$ буферного подслоя и (0001) нитридной пленки со структурой вюртцита, например GaN, с другой стороны. Для этого параметр элементарной кубической ячейки материала буферного подслоя a следует выбрать таким, чтобы длина трансляции вдоль направления $\langle 112 \rangle$ этой ячейки была близка к кратным значениям величины трансляции вдоль $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ Al_2O_3 , т.е.: $a \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} = n \cdot 2.747 \text{ \AA}$, где 2.747 \AA — длина трансляции вдоль $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ Al_2O_3 , а n — целое число, отсюда $a = 1.125 \cdot n \text{ (\AA)}$. Так как длины сторон элементарных гексагональных ячеек нитридов металлов Ga, In и Al, а также твердых растворов на их основе находятся в диапазоне от 3.11 до 3.25 \AA и практически отсутствуют материалы с параметром a , меньшим 2.5 \AA и большим 13 \AA , то можно использовать буферный подслоя из материала с параметром a , численное значение которого близко к $a = 1.125 \cdot n \text{ (\AA)}$, где n равно целым числам 3, 4, 6 или 8. При значениях n , равных 5, 7 или 9, длины трансляций вдоль $\langle 112 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ поверхности $\{111\}$ буферного подслоя не кратны длинам трансляций вдоль $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ и $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ нитридных полупроводниковых пленок. Отметим, что и в случае осаждения гетероэпитаксиальной нитридной полупроводниковой пленки с политипной структурой типа цинковой обманки материал буферного подслоя также может выбираться из указанных выше условий.

Устранение 30° -ного разворота приводит к параллельности плоскостей естественного скола сапфира и полупроводниковых нитридных пленок. Это позволяет изготовить резонатор Фабри–Перо лазера из плоскостей естественного скола пленок.

Гетероэпитаксиальный буферный подслоя может быть выполнен из материала кубической сингонии с кристаллическими решетками различного типа, такими как, например, α – Fe, NaCl, шпинель. Материалом буферного подслоя могут быть диэлектрики, такие, например, как MgO, In_2CdO_4 или электропроводящие материалы, такие как, например, нитриды или карбиды ниобия, гафния, скандия, титана, твердые растворы на их основе, а также металлы: ниобий, тантал. Буферный подслоя из проводящего материала может дополнительно выполнять функции одного из контактов (электродов) полупроводникового устройства.

Использование нескольких буферных подслоев позволит осуществлять более плавное согласование параметров решеток и коэффициентов термического расширения сапфировой подложки и полупроводниковой пленки.

Мы начали экспериментальные исследования по проверке данного предложения. Они подтвердили, что гетероэпитаксиальный буферный подслои, например, из $\{111\}$ ниобия устраняет 30° -ный разворот пленки (0001) AlN относительно поверхности (0001) сапфировой подложки. При этом рассогласование параметров решеток вдоль взаимно параллельных направлений $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ $\text{Al}_2\text{O}_3 // \langle 112 \rangle$ Nb и $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ $\text{Al}_2\text{O}_3 // \langle 110 \rangle$ Nb меньше 2%. А тонкая пленка $\{111\}$ нитрида ниобия, сформированная впоследствии на поверхности ниобиевого подслоя, и осажденная на нее пленка (0001) AlN соприкасаются атомными плоскими сетками решеток, одинаковыми по симметрии и практически с равными (с точностью 0.1%) длинами трансляции. А 30° -ный разворот в плоскости подложки $(11\bar{2}0)$ Al_2O_3 между направлениями $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ Al_2O_3 и $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ AlN был устранен с помощью буферного подслоя из $\{111\}$ NbN. В этом случае рассогласование параметров вдоль взаимно параллельных направлений $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ Al_2O_3 и $\langle 112 \rangle$ NbN меньше 2% и гетероэпитаксиальные слои (111) NbN и (0001) AlN соприкасаются практически неотличающимися плоскими атомными сетками.

Гетероэпитаксиальные пленки Nb, NbN и AlN на сапфировые подложки (0001) и $(11\bar{2}0)$ осаждались методом магнетронного распыления. Ориентационные соотношения определялись методом рентгеновской дифрактометрии и были следующими:

$$(0001)\langle 1\bar{1}00 \rangle \text{Al}_2\text{O}_3 // \{111\}\langle 112 \rangle \text{NbN} // (0001)\langle 1\bar{1}00 \rangle \text{AlN}$$

и

$$(11\bar{2}0)[1\bar{1}00]\text{Al}_2\text{O}_3 // \{111\}[112] \text{NbN} // (0001)[1\bar{1}00] \text{AlN}.$$

Отметим, что полученные нами ориентационные соотношения гетероэпитаксиальных пленок (111) Nb на (0001) Al_2O_3 и (111) NbN на $(11\bar{2}0)$ Al_2O_3 соответственно совпадают с результатами работ [3] и [4].

Таким образом, показана возможность устранения 30° -ного разворота (0001) нитридной полупроводниковой пленки в плоскости сапфировой подложки (0001) или $(11\bar{2}0)$ при использовании гетероэпитаксиального буферного слоя из материала с кубической структурой, с параметром элементарной ячейки a , близким к значению $a = 1.125 \cdot n$ (А), у которого направление $\langle 112 \rangle$, расположенное в его поверхности $\{111\}$, параллельно $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ поверхности подложки.

Список литературы

- [1] *Morkos H., Strite S., Gao G., Lin M.E., Sverdlov B., Burns M.* // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. N 3. P. 1363–1398.
- [2] *Котелянский М.И., Котелянский И.М., Кравченко В.Б.* Полупроводниковый прибор на основе гетероэпитаксиальных пленок соединений $Ga_{1-x}Al_xN$. Международная заявка на патент РСТ/RU 98/00397 от 25.11.1998.
- [3] *Masek K., Matolin V.* // Thin Solid Film. 1998. 317. P. 183–188.
- [4] *Носков И.П., Титенко Ю.В., Коржинский Ф.И., Комашко В.А.* // Кристаллография. 1980. Т. 25. В. 4. С. 878–880.