

06;07;12

Получение нанокристаллических пленок кремния на подложках из полиимида с применением импульсного воздействия излучения эксимерного лазера

© М.Д. Ефремов, В.А. Володин, Л.И. Федина,
А.А. Гутаковский, Д.В. Марин, С.А. Кочубей,
А.А. Попов, Ю.А. Минаков, В.Н. Уласюк

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск
E-mail: volodin@isp.nsc.ru

Институт микроэлектроники и информатики РАН, Ярославль
ЗАО „ЭЛТАН Ltd“, Фрязино

Поступило в Редакцию 7 февраля 2003 г.

Используя кристаллизацию аморфных пленок с применением наносекундных импульсных воздействий излучения эксимерного лазера, получены пленки поликремния на подложках из полиимида. Структурные характеристики пленок были исследованы с применением методик спектроскопии комбинационного рассеяния света и высокоразрешающей электронной микроскопии. Для применяемых режимов лазерной кристаллизации были получены нанокристаллические пленки кремния со средним размером кристаллитов 5 nm. Полученные результаты представляют интерес для разработки технологии создания приборов широкоформатной микроэлектроники (активных матриц тонкопленочных транзисторов и т.д.) на гибких недорогих подложках.

С развитием широкоформатной электроники актуальной становится проблема получения полупроводниковых пленок с хорошими электрофизическими характеристиками на недорогих не тугоплавких подложках. В последнее время наблюдается устойчивая тенденция к постоянному увеличению их площади, так называемый „обратный закон Мура“ [1]. Наметилась также конкуренция полупроводниковым пленкам со стороны органических материалов как в области широкоформатной оптоэлектроники, так и в традиционных для полупроводников отраслях [2]. Все это вынуждает искать пути создания технологии получения полупроводниковых пленок на гибких пластиковых подложках большой площади. Основной трудностью здесь является низкая температура

пластичности данных подложек. Применение кристаллизации под воздействием импульсного нагрева излучением эксимерного лазера позволяет преодолеть данную проблему [3–5]. Например, этим способом были получены поликристаллические пленки кремния на подложке polyethersulphone и на их базе созданы тестовые тонкопленочные транзисторы [6].

Для создания исходных пленок кремния использовалось плазмохимическое осаждение в низкочастотном разряде. Этот способ отличается повышенной скоростью осаждения при обеспечении удовлетворительных электрофизических свойств [7]. Пленки кремния толщиной 100 nm были осаждены на подложку из полиимида с буферным слоем Si_3N_4 толщиной 370 nm. Выбор подложки был обусловлен хорошими диэлектрическими и механическими свойствами полиимида и его относительно высокой температурой пластичности (до 250°C). Для проведения лазерных обработок использовался эксимерный лазер XeCl с длиной волны излучения 308 nm. Коэффициент поглощения света в аморфном кремнии для этой длины волны равен $1.5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-1}$ [8], т.е. все излучение поглощается в пленке аморфного кремния и не достигает подложки. За счет малой длительности импульса (порядка 10 ns) действие излучения не приводит к значительному перегреву подложки. Так, согласно расчетам пространственного и временного распределения температуры, для используемых режимов обработок температура на границе подложка/буферный слой не превышала 120°C. Использовались режимы обработок с плотностью энергии лазерного излучения как вблизи, так и выше порога для возникновения макроскопических областей расплава пленки аморфного кремния. Определенное из эксперимента по отражению света с наносекундным временным разрешением значение порога плавления по литературным данным составляет 120–150 mJ/cm^2 [9]. Более подробно метод кристаллизации с применением наносекундных импульсных воздействий излучения эксимерного лазера описан в работе [4].

Для регистрации спектров комбинационного рассеяния света (КР) использовалась автоматизированная в стандарте КАМАК установка на базе спектрометра ДФС-52 (ЛОМО, С.-Петербург) с накачкой аргоновым лазером (линия 514.5 nm). Спектры регистрировались в геометрии квазиобратного рассеяния, угол падения лазерного пучка был близок к углу Брюстера для кремния, рассеянный свет регистрировался без использования поляризатора, т.е. регистрировался свет с произвольной поляризацией. Структурные исследования пленок кремния проведены

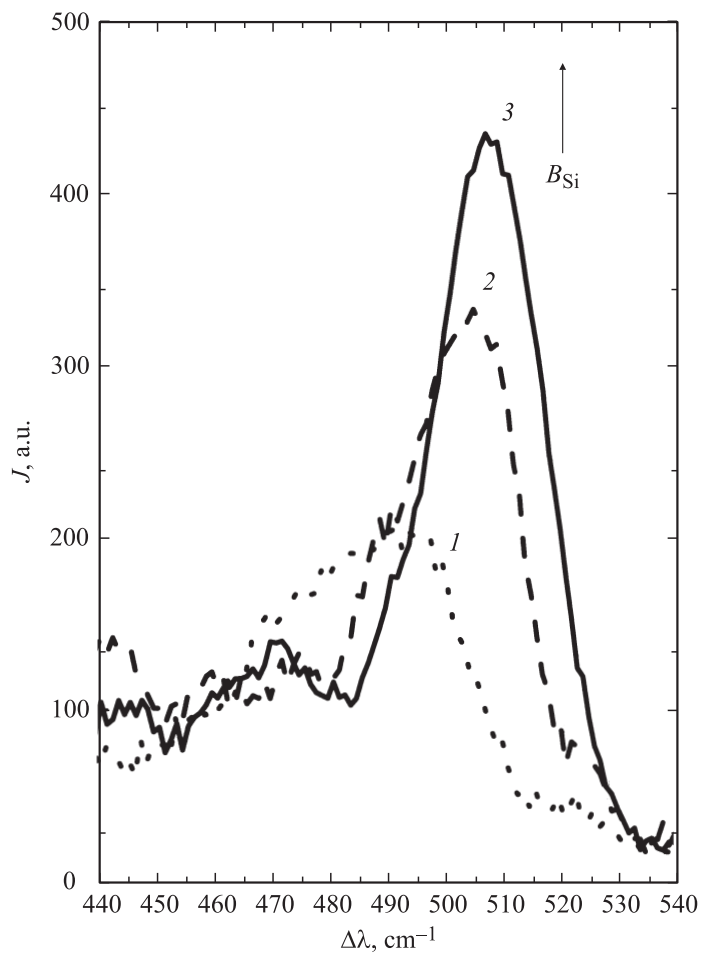


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света: 1 — исходной пленки; 2 — пленок, обработанных излучением ХеСІ лазера в режиме без плавления; 3 — с частичным плавлением.

на высокоразрешающем электронном микроскопе JEOL-4000EX при использовании ускоряющего напряжения 250 keV, для которого пространственное разрешение по точкам составляло 0.19 nm.

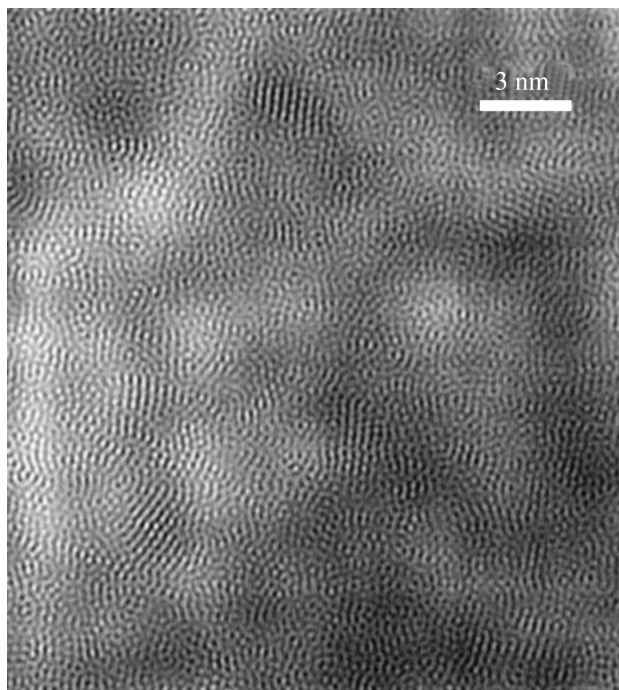


Рис. 2. ВРЭМ изображение образца, полученного лазерной кристаллизацией в режиме без плавления.

На рис. 1 приведены спектры КР как исходной пленки, так и пленок, подвергшихся воздействию излучения эксимерного лазера. В спектре исходного образца (кривая 1) присутствует пик с шириной около 50 cm^{-1} с положением максимума примерно 485 cm^{-1} . Этот пик соответствует КР на оптических колебаниях Si–Si связей в аморфном кремнии. Наличие „высокочастотного“ плеча (до 500 cm^{-1}) свидетельствует о наличии в исходной пленке небольшого количества нанокристаллических включений с размерами примерно 1.5 nm. Для кристаллизации пленок в режиме использования импульсов излучения эксимерного лазера с плотностью энергии менее порога плавления потребовалось применить многократные воздействия (всего 5 импульсов). В спектре КР образца, обработанного в данном

режиме (кривая 2), видна трансформация пика — он стал более узким (22 cm^{-1}) и сместился в область больших волновых чисел (положение максимума 503 cm^{-1}). Собственные колебательные моды нанокристаллов являются пространственно локализованными, поэтому спектр КР нанокристаллов характеризуется пиком, положение которого зависит от их размеров, и при увеличении размеров более 50 nm почти не отличается по положению от пика КР монокристаллического кремния — 520 cm^{-1} . Ширина пика определяется дисперсией нанокристаллов по размерам, а также временем жизни фононов. Для расчета размеров кристаллитов был использован метод эффективной свертки колебательных состояний [10]. Согласно расчетам, в пленке, спектр КР которой приведен на кривой 2, средний размер кристаллитов составляет около 3 nm . Увеличение плотности энергии в импульсе выше порога плавления привело к кристаллизации пленки уже под воздействием одного импульса и к увеличению средних размеров нанокристаллов. Из положения пика КР (кривая 3, максимум 508 cm^{-1}) можно оценить средний размер нанокристаллов в $4\text{--}5 \text{ nm}$. Из соотношения интенсивностей „аморфного“ и „нанокристаллического“ пика КР можно сделать вывод, что в последнем случае пленка практически полностью кристаллизовалась.

Данные высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ) хорошо согласуются с результатами, полученными на основе анализа спектров КР света. На рис. 2 представлено ВРЭМ изображение атомной структуры нанокристаллической пленки кремния, кристаллизованной в режиме, соответствующем кривой 2 спектра КР света на рис. 1. Можно видеть, что средний размер кристаллитов в данном случае составляет около 3 nm . Однако размер отдельных кристаллитов может достигать 10 nm . Локальная объемная плотность кристаллитов варьируется от 10^{16} до 10^{19} cm^{-3} . Следует отметить, что характерной морфологической особенностью кристаллитов, сформированных при твердофазной лазерной перекристаллизации, является отсутствие четких границ кристаллитов в аморфной матрице. Это связано, как мы предполагаем, с цепочечным механизмом кристаллизации, при котором зародышем кристалла служит одномерная цепочка атомов кремния в направлении $\langle 110 \rangle$, формирующаяся путем малых перемещений близко расположенных атомов аморфной матрицы. Наличие $\langle 110 \rangle$ атомных цепочек отчетливо прослеживается в структуре окружающей кристаллиты аморфной матрицы, однако размеры этих цепочек невелики и соответствуют минимальным размерам кристаллитов аморфной матрицы

1–1.5 nm (рис. 2). Предполагается, что образование таких кристаллитов в исходных аморфных пленках кремния связано с формированием кластеров кремния в газовой фазе при осаждении кремния плазмохимическим методом [11]. Дополнительной стимуляцией кристаллизации является наличие ионной составляющей в осаждаемом паре кремния [12].

Таким образом, с применением наносекундных импульсных воздействий излучением эксимерного лазера были кристаллизованы исходные пленки аморфного кремния на пластиковой подложке. Данная технология позволяет проводить сканирующие обработки для получения пленок нано- и микрокристаллического кремния на широкоформатных подложках.

Список литературы

- [1] *Shur M.S., Rumyantsev S.L., Gaska R.* // 10th International Symposium „Nanostructures: Physics and Technology“. 2002. P. 618–622.
- [2] *Alferov Zh.I.* // 10th International Symposium „Nanostructures: Physics and Technology“. 2002. Closing remarks.
- [3] *Chen S., Hsieh I.C.* // Solid State Technology. January 1996. N 1. P. 113–120.
- [4] *Ефремов М.Д., Болотов В.В., Володин В.А.* и др. // ФТП. 2002. Т. 36. В. 1. С. 109–116.
- [5] *Efremov M.D., Bolotov V.V., Volodin V.V.* et al. // Solid State Communications. 1998. V. 108. N 9. P. 645–648.
- [6] *Gosain D.P., Noguchi T., Usui S.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. V. 39. N 3A/B. P. L179–L181.
- [7] *Будагян Б.Г., Попов А.А., Бердников А.Е.* // Тез. докл. Всерос. симпозиума „Аморфные и микрокристаллические полупроводники“. С.-Петербург, 5–9 июля 1998 г. С. 21–22.
- [8] *Гавриленко В.И., Грехов А.М., Корбутяк Д.В., Литовченко В.Г.* Оптические свойства полупроводников. Киев: Наукова думка, 1987. 607 с.
- [9] *Sameshima T., Usui S.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. N 3. P. 1281–1289.
- [10] *Paillard V., Puech P., Laguna M.A.* et al. // Journ. of Appl. Phys. 1999. V. 86. N 4. P. 1921–1925.
- [11] *Kronik L., Fromherz R., Ko E., Gantefor G., Chelikowsky J.* // Nature Materials. 2002. V. 1. P. 1–4.
- [12] *Spinella C., Lombardo S., Priollo F.* // Appl. Phys. Rev. 1998. V. 84. N 10. P. 5383–5414.