

06.2;07

## **Влияние имплантации ионов фосфора на кристаллизацию пленок аморфного кремния при воздействии импульсов излучения эксимерного лазера**

© М.Д. Ефремов, В.А. Володин, С.А. Аржанникова,  
С.А. Кочубей, В.Н. Уласюк

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск  
E-mail: volodin@isp.nsc.ru  
ЗАО „ЭЛТАН“, Фрязино

Поступило в Редакцию 10 августа 2004 г.

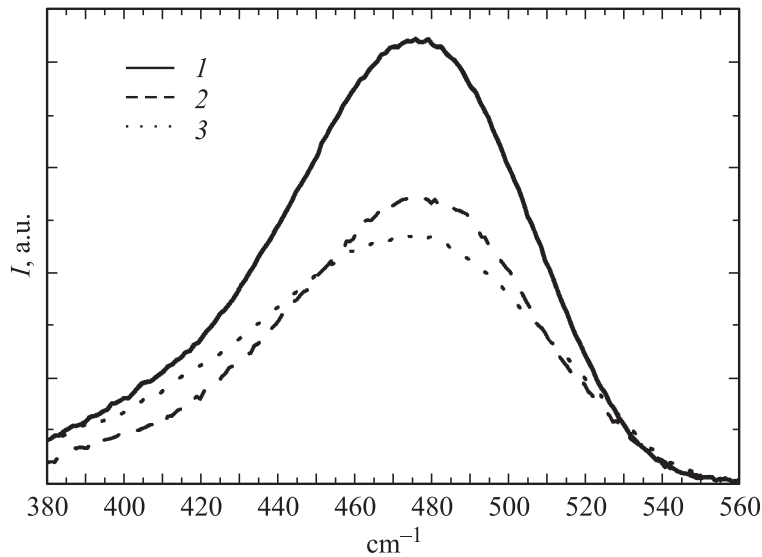
Исследовалось влияние фосфора на кристаллизацию тонких аморфных пленок кремния при воздействии наносекундных импульсов излучения эксимерного ХеСl лазера. Полученные плазмохимическим осаждением пленки аморфного кремния (толщина 90 nm) на стеклянной подложке были подвергнуты имплантации ионами фосфора с дозами  $3 \cdot 10^{14}$  и  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Использовались лазерные обработки с плотностью энергии как выше, так и ниже порога плавления аморфного кремния. Структурные характеристики пленок были исследованы с применением спектроскопии комбинационного рассеяния света. Из анализа экспериментальных данных сделан вывод, что, фосфор стимулирует зародышеобразование, особенно в режиме жидкофазной кристаллизации. Полученные результаты представляют интерес для совершенствования технологии создания тонкопленочных транзисторов на нетугоплавких подложках.

Широкоформатная электроника является одним из самых динамично развивающихся секторов микроэлектроники в последнее время. Связано это с бурным ростом производства плоских дисплеев и индикаторов для отображения визуальной информации. В качестве управляющего элемента как для жидкокристаллических, так и для светодиодных дисплеев нового поколения нет конкурента активной матрице тонкопленочных транзисторов (АМ ТПТ) на базе аморфного или поликристаллического кремния. Поэтому остается актуальной проблема активации мелкой примеси в тонких пленках аморфного и поликристаллического кремния для легирования областей контактов стока и истока. Обычно для акти-

вазии мелкой примеси используются термические обработки (печные отжиги) с достаточно высоким термическим бюджетом — температуры выше  $900^{\circ}\text{C}$  и времена более часа. Данные режимы неприемлемы при использовании недорогих нетугоплавких стеклянных подложек. В этом случае можно использовать импульсные термические обработки с применением излучения эксимерных лазеров [1]. Данный подход актуален также для создания сверхмелких  $p$ - $n$ -переходов ([2] и ссылки в ней). Для создания ТПТ легирующая примесь может вводиться в концентрации до нескольких единиц на  $10^{19}\text{cm}^{-3}$ . Известно, что примеси доноров и акцепторов с такой концентрацией влияют на кинетику кристаллизации аморфного кремния в процессе термических обработок [3–5]. В данной работе исследовалось влияние фосфора на кристаллизацию тонких пленок аморфного кремния при импульсном воздействии излучения эксимерного лазера.

Для исследования влияния мелкой примеси на кинетику зародышеобразования и кристаллизации, а также для исследования процессов ее активации при импульсных лазерных воздействиях были изготовлены следующие структуры. Для „тыльного“ электрического контакта на нетугоплавкое стекло с использованием метода физического осаждения была нанесена тонкая пленка алюминия. Затем на данную структуру была осаждена с использованием метода плазмохимического осаждения пленка аморфного кремния толщиной в  $90\text{nm}$ . Толщина пленки и ее оптические константы контролировались по данным эллипсометрии (при этом использовался He–Ne-лазер, длина волны  $633\text{nm}$ ). Полученные структуры были подвергнуты имплантации ионами фосфора с дозами  $3 \cdot 10^{14}$  и  $3 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-2}$ . Энергия ионов составляла  $30\text{keV}$ . Средний пробег ионов фосфора (вычисленный стандартной программой TRIM) составлял примерно  $500\text{Å}$ , так что максимум распределения концентрации ионов приходился на середину пленки. При имплантации  $1/3$  часть каждой из пленок была закрыта экраном и осталась нелегированной (для сравнения).

Структурные характеристики пленок были исследованы с применением спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР). Спектры КР регистрировались при комнатной температуре в геометрии квази-обратного рассеяния. Поляризация рассеянного света не анализировалась. Для возбуждения КР использовалась линия аргонового лазера с длиной волны  $514.5\text{nm}$ .



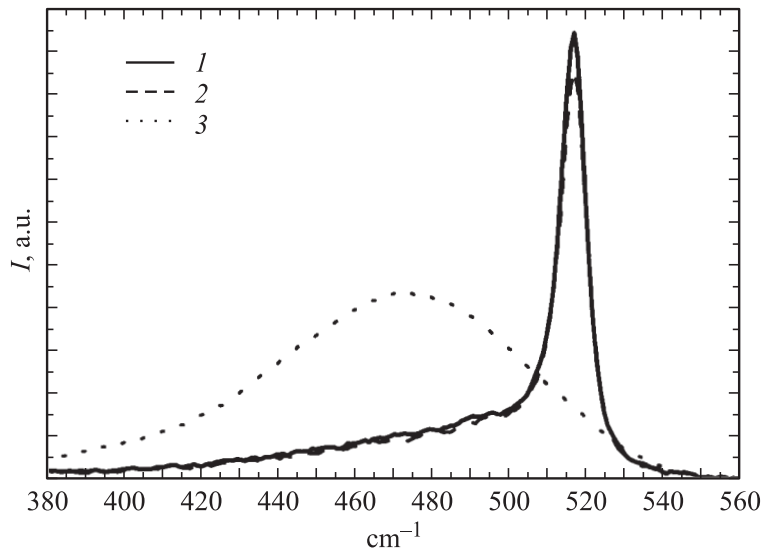
**Рис. 1.** Спектры КР исходной пленки аморфного кремния и пленок, имплантированных  $P^+$  с различными дозами.

И имплантированные, и не имплантированные области структур были подвергнуты импульсным лазерным обработкам со следующими параметрами. Длина волны (XeCl лазер) составляла 308 nm, длительность импульса (ширина на полувысоте по мощности) была менее 25 ns. Использовались три режима обработки с различной плотностью энергии в импульсе ( $\rho$ ): режим  $A-\rho$  достаточен для расплава практически всей пленки, один импульс; режим  $B-\rho$  выше порога плавления пленки, но недостаточная для расплава ее на всю глубину, один импульс; режим  $C-\rho$  ниже порога плавления пленки, десять импульсов. По литературным данным пороговая плотность энергии, достаточная для начала нелокального плавления аморфного кремния, составляет 120–150 mJ/cm<sup>2</sup> [6]. Используемые режимы позволяют проводить кристаллизацию тонких пленок аморфного кремния на нетугоплавких (даже пластиковых) подложках [7,8].

На рис. 1 показаны спектры КР света исходной пленки  $\omega$  и пленок непосредственно после имплантации ионами фосфора с концентрацией

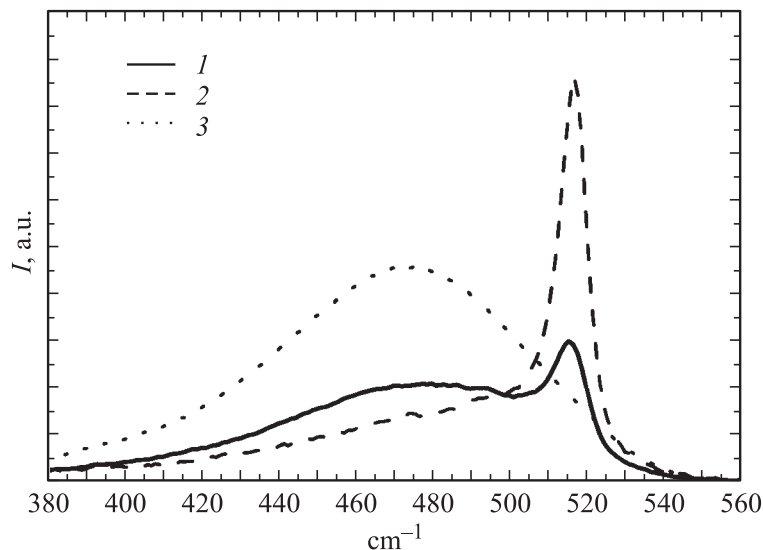
$3 \cdot 10^{14}$  (2) и  $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  (3) соответственно. Вследствие отсутствия трансляционной симметрии оптические переходы в аморфном кремнии не ограничены законом сохранения квазиимпульса, поэтому его спектр КР в оптической области характеризуется эффективной плотностью колебательных состояний и представляет собой широкий пик с максимумом в районе  $480 \text{ cm}^{-1}$  [9]. Собственные колебательные моды нанокристаллов кремния являются пространственно локализованными, поэтому спектр КР нанокристаллов характеризуется пиком, положение которого зависит от их размеров и при увеличении размеров более  $50 \text{ nm}$  почти не отличается по положению от пика КР монокристаллического кремния —  $520 \text{ cm}^{-1}$  [10]. Ширина пика определяется дисперсией нанокристаллов по размерам, а также соотношением неопределенности по энергии и волновому числу вследствие конечного времени жизни фононов и их пространственной локализации. Интенсивность „кристаллического“ пика пропорциональна доле нанокристаллической фазы. Из рис. 1 видно, что исходные пленки не содержали нанокристаллических включений. Видно, также, что ионная имплантация приводит к некоторому ослаблению интенсивности КР света, а при большой дозе и к некоторому смещению и увеличению ширины пика. Известно, что ширина „аморфного“ пика определяется средним отклонением Si–Si связей от идеальной тетраэдрической конфигурации [11]. Следовательно, эффект увеличения ширины пика может быть обусловлен еще большим увеличением степени разупорядоченности пленок при ионной имплантации. По данным эллипсометрии показатель преломления исходных пленок составлял 3.15, что соответствует аморфному гидrogenизированному кремнию, с содержанием атомарного водорода порядка 10–20%. Имплантация ионами фосфора с дозой  $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  привела к некоторому уменьшению показателя преломления (до 3.05) и повышению показателя поглощения.

Спектры КР света исходных пленок аморфного кремния и пленок, имплантированных ионами фосфора после лазерных обработок в режиме, где плотность энергии в импульсе превышает порог плавления, приведены на рис. 2 и 3. Основные выводы, которые можно сделать из данных спектроскопии КР света от образцов, прошедших лазерные обработки с плотностью энергии выше порога плавления, заключаются в следующем. В режиме практически полного плавления пленок (рис. 2) фосфор со средней концентрацией  $3.3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  (доза имплантации  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) практически не влиял на кристаллизацию аморфных пле-



**Рис. 2.** Спектры КР пленок аморфного кремния, исходной и имплантированных  $P^+$  с различными дозами после импульсной лазерной обработки в режиме полного плавления пленки.

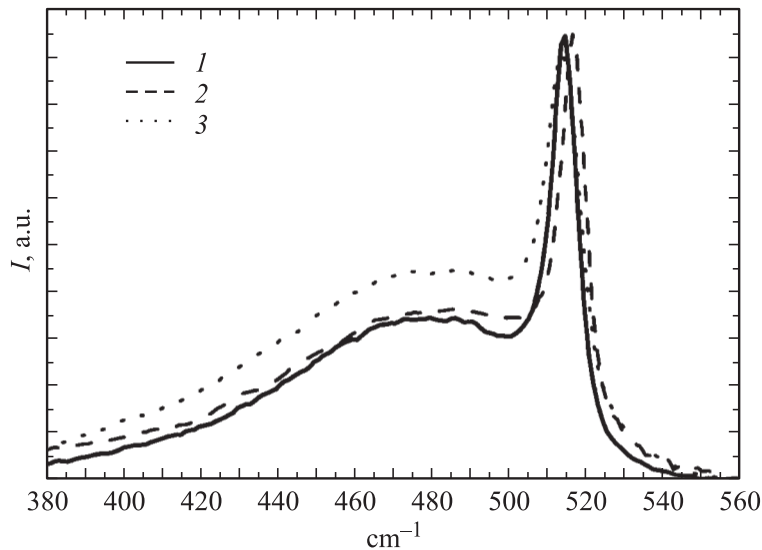
нок. Пленки, имплантированные ионами фосфора с дозой  $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , остались практически аморфными. При этом по данным эллипсометрии показатель преломления этой пленки увеличился до 3.15, а показатель поглощения возрос примерно в 2 раза по сравнению с исходными пленками. По литературным данным фосфор ускоряет кристаллизацию как при печных, так и при лазерных отжигах, если температура остается ниже температуры плавления кремния [3–5,12]. По-видимому, в процессах, происходящих с образованием фазы расплавленного кремния, роль фосфора заключается в следующем. Средняя концентрация атомов фосфора в пленке для большой дозы составляет  $3.3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Если предположить, что, начиная с некоторой критической концентрации, каждый атом фосфора является центром зарождения кристаллической фазы в расплаве, то расстояние между зародышами при данной дозе составляет приблизительно  $14 \text{ \AA}$ . Таковыми должны быть соответственно и средние размеры кристаллитов. Но это сравнимо и даже меньше



**Рис. 3.** Спектры КР пленок аморфного кремния, исходной и имплантированных  $P^+$  с различными дозами после импульсной лазерной обработки в режиме частичного плавления пленки.

длины корреляции (параметр, отражающий порядок) в аморфном кремнии, который составляет  $10\text{--}15 \text{ \AA}$  [13], т. е. пленка, вследствие большой вероятности образования центров кристаллизации, при переохлаждении расплава аморфизуется. Этот процесс схож с процессом аморфизации пленок кремния при сильном переохлаждении расплава вследствие сильного теплоотвода [14]. Схожая картина наблюдается и для режима лазерных обработок с плотностью энергии выше порога плавления, но не достаточной для расплава всей пленки кремния (рис. 3). Единственное отличие заключается в том, что в этом режиме фосфор (доза имплантации  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) приводил к росту скорости кристаллизации.

Интересно сравнить эти результаты с результатами по кристаллизации пленок аморфного кремния, имплантированных ионами фосфора, с применением наносекундных лазерных обработок, но с плотностью энергии в импульсе ниже порога плавления пленок. Данные результаты представлены на рис. 4. По соотношению интегральных интенсивностей



**Рис. 4.** Спектры КР пленок аморфного кремния, исходной и имплантированных  $P^+$  с различными дозами после импульсной лазерной обработки с плотностью энергии ниже порога плавления пленки.

„аморфного“ и „кристаллического“ пиков можно оценить объемную долю содержания кристаллической фазы в пленках [7,11]. Доля кристаллической фазы в не имплантированной пленке составляет примерно 20%, а в имплантированной 25%, т.е. в соответствии с литературными данными фосфор ускоряет кристаллизацию в твердофазном режиме. Необходимо также отметить следующее. Положение „кристаллического“ пика в не имплантированной пленке составляет  $516 \text{ cm}^{-1}$ , а в имплантированной  $513.5 \text{ cm}^{-1}$ . В последнем случае пик также несколько уширен. Это говорит о том, что размеры кристаллитов в пленке, имплантированной ионами фосфора, меньше. Данный факт является следствием увеличения вероятности образования кристаллических зародышей под влиянием фосфора. Раз вероятность их образования выше, их концентрация выше, а размеры соответственно меньше. Лазерные обработки (во всех режимах) приводили к возрастанию проводимости имплантированных фосфором пленок на несколько порядков. Отсюда

можно предположить, что данные обработки приводили к переводу мелкой примеси (фосфора) в электрически активное состояние.

Следует отметить, что активация примеси была проведена для пленок, осажденных на нетугоплавкие (температура размягчения меньше 350°С) подложки. Используя подобный подход, можно активировать мелкие примеси в пленках кремния, осажденных и на еще менее тугоплавких подложках. Еще одно преимущество данного подхода — малые времена обработок. За времена в десятки наносекунд примесь не сумеет распространиться на большие расстояния в процессе диффузии, что важно для создания мелких  $p-n$ -переходов.

Таким образом, установлено, что фосфор приводит к значительному росту вероятности зародышеобразования при фазовом переходе, протекающем посредством образования фазы расплава кремния. При лазерных обработках с плотностью энергии в импульсе ниже порога плавления пленок влияние фосфора заключается в увеличении скорости кристаллизации. Обработки излучением эксимерного лазера в обоих режимах приводят к активации фосфора.

Авторы признательны О.И. Семеновой за изготовление аморфных пленок и В.Г. Серяпину за проведение ионной имплантации.

## Список литературы

- [1] *Efremov M.D., Volodin V.A., Fedina L.I.* et al. // Abstracts of European Materials Research Society. Spring Meeting, Strasbourg, 2000. P. O/P24.
- [2] *Timans P.J., Lerch W., Paul S.* et al. // Solid State Technology. 2004. May. P. 35–40.
- [3] *Двуреченский А.В., Попов В.П., Кашиников Б.П.* и др. // Поверхность. 1986. В. 9. С. 77–81.
- [4] *Гретцшель Р., Двуреченский А.В., Попов В.П.* // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 9. С. 3134–3136.
- [5] *Csepregi L., Kennedy E.F., Gallagher T.J.* et al. // Journal of Appl. Phys. 1977. V. 48. N 10. P. 4234–4246.
- [6] *Sameshima T., Usui S.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. N 3. P. 1281–1289.
- [7] *Ефремов М.Д., Болотов В.В., Володин В.А.* и др. // ФТП. 2002. Т. 36. В. 1. С. 109–116.
- [8] *Ефремов М.Д., Володин В.А., Федина Л.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 13. С. 89–94.



- [9] *Smith J.E., Jr., Brodsky M.H., Crowder B.L.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1971. V. 26. P. 642–644.
- [10] *Iqbal Z., Veptek S., Webb A.P.* et al. // *Solid State Commun.* 1981. V. 37. P. 993–995.
- [11] *Beeman D., Tsu R., Thorpe M.F.* // *Phys. Rev. B.* 1985. V. 32. N 2. P. 874–878.
- [12] *Beserman R., Khait Yu.L., Chack A.* et al. // *Journal of Non-Crystalline Solids.* 2002. V. 299–302. P. 736–740.
- [13] *Рассеяние света в твердых телах: проблемы прикладной физики / Под ред. М. Кардоны.* М.: Мир, 1979. 392 с.
- [14] *Sameshima T., Usui S.* // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 70. N 3. P. 1281–1289.