

05.3;06;07

## **Динамика отжига ионно-аморфизированного кремния наноимпульсным воздействием ультрафиолетового излучения эксимерного лазера**

© Г.Д. Ивлев, Е.И. Гацкевич

Институт электроники НАНБ, Минск  
E-mail: ivlev@inel.bas-net.by

Поступило в Редакцию 25 июня 2002 г.

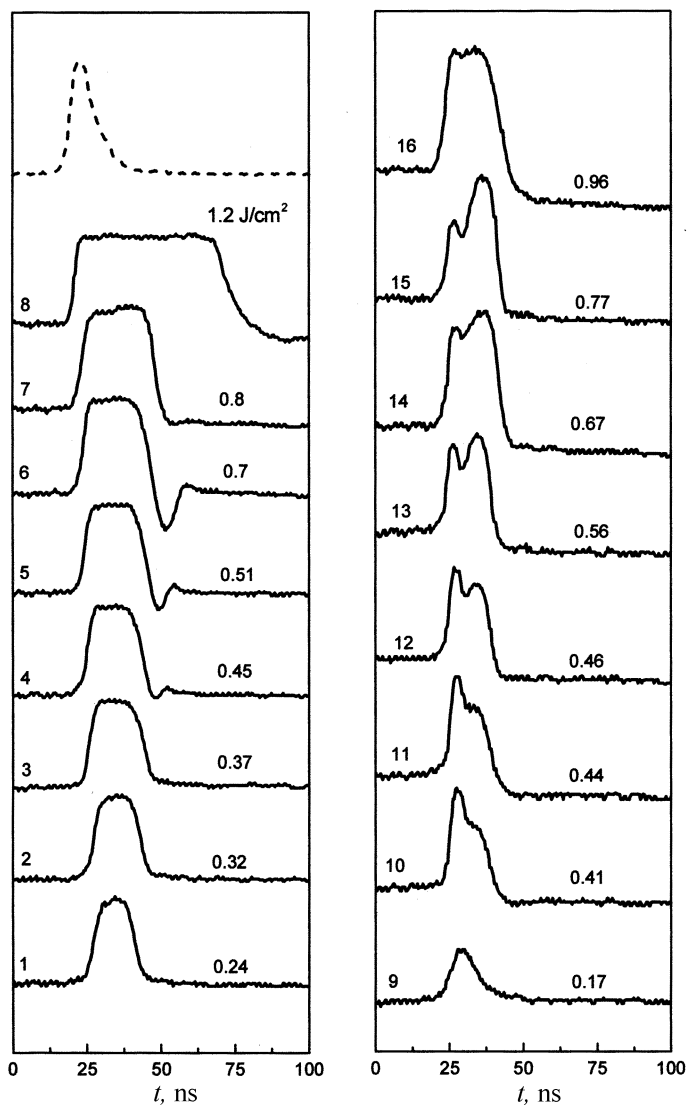
Методом оптического зондирования *in situ* на  $\lambda = 633$  nm с детектированием отраженного от образца зондирующего пучка изучались фазовые превращения, происходящие в ионно-аморфизированном кремнии под действием наносекундных импульсов УФ-излучения ArF эксимерного лазера. Установлено, что эпитаксиальная кристаллизация расплавленного слоя кремния происходит при плотностях энергии облучения  $W > 0.8$  J/cm<sup>2</sup>. При значениях  $0.2 < W < 0.7$  J/cm<sup>2</sup> наблюдается аморфизация Si на стадии отвердевания, причем начальное и конечное состояния аморфной фазы неадекватны. Аморфизация кремния из расплава сопровождается зарождением удаленных друг от друга кристаллических центров. Их присутствие изменяет кинетику фазовых превращений при повторном воздействии лазерного излучения, приводит к формированию поликристаллической структуры и обуславливает возможность промежуточной кристаллизации Si в последовательности лазерно-индуцированных фазовых превращений.

Модификация и кристаллизация тонких слоев аморфного кремния (*a*-Si) воздействием наносекундных импульсов ультрафиолетового (УФ) излучения эксимерных лазеров — весьма привлекательный метод в технологии формирования тонкопленочных солнечных элементов и транзисторов в активных матрицах жидкокристаллических (ЖК) дисплеев [1,2]. В этой связи актуальной задачей является изучение фазовых превращений, происходящих в *a*-Si под действием излучения лазеров данного типа. Ранее в этом аспекте нами исследовалась [3] динамика отжига излучением ArF эксимерного лазера тонких гидро-

генизированных пленок  $a$ -Si, получаемых путем разложения силана в плазме тлеющего разряда. Установлено, что для кристаллизации пленки необходимо воздействие по крайней мере двух лазерных импульсов при плотности энергии выше порога плавления  $W_{ma}$ . Однократное же облучение пленки приводит к образованию из расплава ( $l$ -Si) новой аморфной фазы  $a_2$ -Si, по структурному состоянию и электрофизическим свойствам отличающейся от исходной фазы  $a_1$ -Si. Изучение в этом аспекте в аналогичных экспериментальных условиях динамики лазерного воздействия на ионно-аморфизированные слои кремния является целью данной работы.

Длительность импульса излучения ArF эксимерного лазера EMG-100 составляла  $\sim 10$  ns по уровню 0.5. Облучаемые образцы — пластины кремния КДБ-10 (111) — были имплантированы ионами  $P^+$  (75 keV) до набора дозы  $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , приводящей к аморфизации монокристалла ( $c$ -Si) на глубину до  $\sim 0.1 \mu\text{m}$ . Плотность энергии  $W$  изменялась перемещением фокусирующей линзы вдоль оси лазерного пучка, при этом непосредственно перед образцом, удаленным от линзы на расстояние больше фокусного, помещалась диафрагма диаметром 0.5 mm, определяющая размер облучаемой зоны, в центр которой в пятно  $\sim 0.05$  mm фокусировался зондирующий пучок He-Ne-лазера ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ), поляризованный в плоскости падения; угол падения  $30^\circ$ . Отраженный от образца поток зондирующего излучения воспринимался кремниевым фотодиодом. Сигнал с фотоприемника подавался на вход запоминающего осциллографа TS-8123, соединенного с компьютером. Время нарастания переходной характеристики регистрирующего тракта составляло около 4 ns.

В условиях эксперимента величина  $W_{ma}$  установлена равной  $\sim 0.16 \text{ J/cm}^2$ , порог эпитаксиальной кристаллизации расплавленного слоя  $W_{ec} \sim 0.75 \text{ J/cm}^2$ , порог абляции  $2.3\text{--}2.4 \text{ J/cm}^2$ . При плотностях энергии  $W_{ma} < W < W_{ec}$  воздействие лазерного импульса не приводит к кристаллизации кремния, а имеют место фазовые переходы  $a_1\text{-Si} \rightarrow l\text{-Si} \rightarrow a_2\text{-Si}$ , происходящие при температуре  $T_{ma}$  примерно на 200 K ниже равновесной точки плавления  $T_{mc}$   $c$ -Si, т.е. в условиях значительного переохлаждения  $l$ -Si [4,5]. Образование  $l$ -Si приводит к возрастанию коэффициента отражения  $R$  зондирующего излучения (см. рисунок), но затем он восстанавливается до исходной величины  $\sim 33\%$ . По мере повышения  $W$  в указанном интервале временная зависимость коэффициента отражения  $R(t)$  качественно меняется: при



Осциллограммы выходного сигнала фотоприемника, детектирующего зондирующее излучение, отраженное от кремния, нагреваемого лазерным импульсом (пунктир).

$W > 0.4 \text{ J/cm}^2$  наблюдается немонотонность установленной конечной величины  $R$ , что видно из осциллограмм 4–6 (далее осц.). Этот эффект наиболее выражен с приближением  $W$  к эпитаксиальному порогу и объясняется тем, что аморфизация кремния ( $l\text{-Si} \rightarrow a_2\text{-Si}$ ) происходит не только со стороны подложки, но и с поверхности расплавленного слоя, вследствие чего коэффициент  $R$  падает ниже исходного значения и проходит через минимум. Такой характер изменения  $R$  следует из расчетов, и обусловлен он интерференцией зондирующего излучения при отражении от системы  $a_2\text{-Si}/l\text{-Si}$  в условиях встречного движения межфазных границ. При воздействии лазерного импульса с энергией  $W \geq 0.8 \text{ J/cm}^2$  расплавленный слой кристаллизуется эпитаксиально (осц. 7.8), и поверхность облученной зоны визуально никак не отличается от полированной поверхности монокристалла. Факт различия структурных состояний  $a_1\text{-Si}$  и  $a_2\text{-Si}$  подтверждается тем, что повторное облучение кремния ( $2W_{ma} < W < W_{ec}$ ) приводит к существенно иной кинетике фазовых превращений и соответственно к иной динамике отражательной способности кремния (осц. 10–15). Предварительное облучение ( $W = W_1 = 0.2\text{--}0.3 \text{ J/cm}^2$ ) приводит к формированию в аморфной матрице при фазовом переходе  $l\text{-Si} \rightarrow a_2\text{-Si}$  удаленных друг от друга кристаллических зародышей (нанокристаллов) размером предположительно менее 5 nm. При повторном плавлении кремния, т. е. плавлении  $a_2\text{-Si}$  ( $W = W_2$ ), эти нанокристаллы, оказавшись в сильно переохлажденной жидкой фазе ( $l_1\text{-Si}$ ) вырастают, образуя зерна поликристалла ( $pc_1\text{-Si}$ ). Далее, если величина  $W \geq 2W_{ma}$ , происходит плавление  $pc_1\text{-Si}$  ( $T_{ma} < T < T_{mc}$ ) и затем образуется вторичный поликристалл ( $l_2\text{-Si} \rightarrow pc_2\text{-Si}$ ), в результате чего зона лазерного воздействия приобретает специфический цветовой оттенок и более низкую отражательную способность, как видно из осц. 10–15. Вследствие дополнительных фазовых переходов  $l_1\text{-Si} \rightarrow pc_1\text{-Si} \rightarrow l_2\text{-Si}$  во временной зависимости  $R$  наблюдается промежуточный спад отражения зондирующего пучка (осц. 10–15), а при относительно малых  $W$  замедление падения  $R$  („плечо“ на осц. 11 и 12). Повышение величины  $W$  смещает минимум  $R$  на передний фронт импульсного сигнала. При энергиях выше  $W_{ec}$  фазовый переход  $l_1\text{-Si} \rightarrow pc_1\text{-Si}$ , вероятно, подавляется из-за высокого темпа нагрева жидкой фазы и распада нанокристаллов.

В заключение отметим, что в экспериментах с аналогичными образцами имплантированного кремния, облучавшихся моноимпульсным излучением рубинового лазера [5], также наблюдались дополнительные

фазовые переходы  $l_1\text{-Si} \rightarrow pc\text{-Si} \rightarrow l_2\text{-Si}$ . В отличие от описанной выше ситуации существенно меньший темп нагрева  $a\text{-Si}$  (длительность импульса 70–80 ns) не препятствует эффективному зарождению нанокристаллов на стадии предплавления  $a\text{-Si}$ , вследствие чего указанные фазовые переходы, т.е. промежуточная кристаллизация кремния (формирование мелкозернистого  $pc\text{-Si}$ ) и последующее плавление происходят не только при  $W_{ma} < W < W_{ec}$ , но и при энергиях облучения выше эпитаксиального порога.

Авторы выражают благодарность В. Хабу за предоставленную возможность проведения эксперимента с использованием эксимерного лазера.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ по проекту Ф99–184.

## Список литературы

- [1] Kim C.D., Ishihara R., Matsumura M. // Jpn. J. Appl. Phys. 1995. V. 34. P. 5971–5976.
- [2] Staudt W., Borneis S., Pippert K.-D. // Phys. Stat. Sol. (a). 1998. V. 166. N 2. P. 743–749.
- [3] Ivlev G., Gatskevich E., Cháb V., Stuchlik J., Vorliček V., Kočka J. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 498–500.
- [4] Sinke W.C., Polman A., Stolk P.A. Physical research. EPM-89. Energy Pulse and Particle Beam Modification of Materials / Ed. by K. Hohmuth, E. Richter. Berlin: Akademie-Verlag, 1990. V. 13. P. 94–99.
- [5] Авакянц Л.П., Ивлев Г.Д., Образцова Е.Д. // ФТТ. 1992. V. 34. P. 3334–3338.