

## ТЕМПЕРАТУРНОЕ ГАШЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В ЛЕГИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ $a\text{-Si} : \text{H}$

*И.П.Звягин, И.А.Курова, Н.Н.Ормонт*

В легированных пленках  $a\text{-Si} : \text{H}$  обнаружено температурное гашение фотопроводимости (ТГФП), сопровождающее эффект Стеблера – Вронского. Для объяснения гашения предложена модель, учитывающая уширение уровней болтающихся связей и влияние температуры на оптическую перезарядку уровней.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию процессов рекомбинации в гидрированном аморфном кремнии  $a\text{-Si} : \text{H}$ , определяющих эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую. В результате, по-видимому, надежно установлено, что основными рекомбинационными центрами служат дефекты типа оборванных связей (ОС) с положительной энергией корреляции <sup>1, 2</sup>. Соответствующая им энергетическая схема с двумя дискретными уровнями используется практически во всех моделях рекомбинации; эти модели сталкиваются, однако, с известными трудностями при объяснении таких особенностей фотопроводимости (ФП), как температурное гашение (ТГ). Для описания ТГ в нелегированных пленках  $a\text{-Si} : \text{H}$  была предложена модель <sup>3</sup>, исходящая из предположения

о том, что темп рекомбинации определяется диффузией дырок по локализованным состояниям хвоста валентной зоны и последующим их захватом на отрицательно заряженные ОС ( $D^-$ -центры). Эта модель позволяет понять причины подавления ТГ межзонной ФП в легированных пленках при эффекте Стеблера – Вронского, т. е. после длительного предварительного освещения пленки, приводящего к увеличению концентрации ОС. Соответственно, эффект ТГФП обычно рассматривался как свидетельство малой концентрации ОС в материале.

В настоящей работе впервые наблюдается ТГФП в легированных пленках  $a\text{-Si} : \text{H}$ , полученных по обычной методике разложением газовой смеси силана и фосфина в высокочастотном тлеющем разряде. На рис. 1 показаны температурные зависимости темновой проводимости и ФП одной из исследованных пленок до и после предварительного освещения при различных длительностях освещения. Видно, что в результате освещения энергия активации темновой проводимости возрастает, т. е. уровень Ферми сдвигается вниз; при энергиях активации, больших примерно 0,65 эВ, возникает ТГФП, сохраняющееся и при больших длительностях освещения. Смещение уровня Ферми при эффекте Стеблера – Вронского обусловлено компенсацией примесных состояний при возрастании концентрации ОС. Поскольку в легированных пленках  $a\text{-Si} : \text{H}$  концентрация ОС достаточно велика и возрастает после предварительного освещения, модель <sup>3</sup> оказывается непригодной для описания ТГ в указанных условиях.

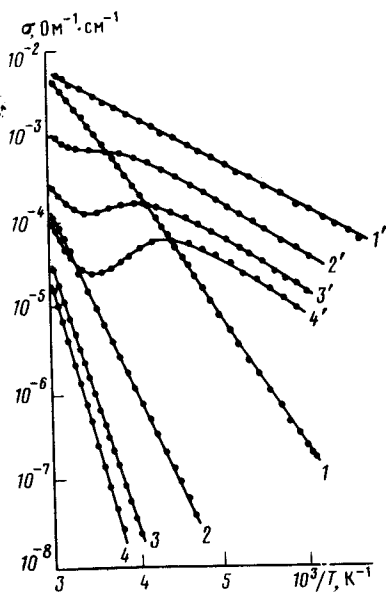


Рис. 1

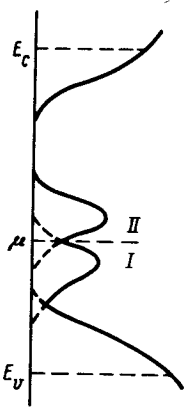


Рис. 2

Рис. 1. Температурная зависимость темновой проводимости (1 – 4) и фотопроводимости (1' – 4') пленки  $a\text{-Si} : \text{H}$ , легированной фосфором, без предварительного освещения (1, 1') и после предварительного освещения в течение 1,5 мин (2, 2'), 15 мин (3, 3') и 30 мин (4, 4')

Рис. 2. Схема плотности состояний в  $a\text{-Si} : \text{H}$

Модель, предлагаемая ниже для объяснения ТГФП в образцах с большой концентрацией ОС, учитывает неизбежно имеющееся в таких образцах уширение уровней ОС, которое может привести к их заметному перекрытию, а также различие коэффициентов захвата электронов  $c_n^0$ ,  $c_n^+$  и дырок  $c_p^0$ ,  $c_p^-$  на нейтральные и заряженные ОС ( $D^0$ ,  $D^+$  и  $D^-$ -центры). В силу перекрытия уширенных альтернативных уровней I и II, отвечающих одно- и двукратному заполнению ОС (рис. 2), равновесные концентрации заряженных ОС, вообще говоря, не малы даже при низких температурах: состояния уровня I с энергиями  $\epsilon$ , лежащие выше равновесного уровня Ферми  $\mu$ , отвечают  $D^+$ -центрам, а состояния уровня II с  $\epsilon < \mu$  –  $D^-$ -центрам. Согласно данным <sup>4, 5</sup>, при комнатной температуре  $c_n^+ \approx 5c_n^0$ ,  $c_p^- \approx 3c_p^0$ ,  $c_n^0 \approx c_p^-$ , так что отношение  $c_n^0 c_p^0 / (c_n^+ c_p^-) = 1/15$ ; при понижении температуры оно становится еще меньшим. В условиях измерения стационарной межзонной ФП из-за малости указанного отношения происходит перезарядка уровней – концентрации заряженных ОС падают, и быстрый канал рекомбинации, связанный с захватом электронов на  $D^+$ -центры, оказывается не-

эффективным. Повышение температуры приводит к освобождению дырок с  $D^0$ -центров с энергиями  $\epsilon < \mu_p(T)$ , где  $\mu_p(T)$  – квазиуровень Ферми для дырок. При малом уровне возбуждения освобожденные дырки переходят на  $D^0$ -центры с  $\epsilon > \mu_p(T)$ ; образование  $D^+$ -центров вызывает возрастание скорости рекомбинационных переходов, уменьшение концентрации электронов в зоне проводимости и появление ТГФП.

Отмеченные выше особенности перезарядки уровней в модели рис. 2 исследовались количественно на основе системы уровней, описывающих переходы между делокализованными состояниями зон, состояниями хвостов и уровнями ОС. Необходимое условие гашения можно записать в виде  $Q > 0$ , где  $Q = -d \ln n_t / d \mu_p$ , а  $n_t$  – концентрация электронов в хвосте зоны проводимости. Расчет показал, что при указанном выше соотношении сечений захвата функция  $Q(\mu_p)$  положительна при всех  $\mu_p$  лишь тогда, когда перекрытие уровней достаточно велико, а отношение концентрации заряженных доноров к концентрации ОС достаточно мало. Это обусловлено тем, что при малом перекрытии уровней концентрация  $D^+$ -центров при повышении температуры почти не меняется, поскольку уровень I находится ниже  $\mu_p$  и не может захватывать дырки. С другой стороны, условие ТГ нарушается и в том случае, когда уровень Ферми лежит высоко, так что равновесная концентрация  $D^+$ -центров мала, и перезарядка практически не происходит. Условия, при которых ТГФП в рассматриваемой модели оказывается возможным, отвечают описанным выше условиям наблюдения ТГ в легированных пленках  $a\text{-Si} : \text{H}$ . Действительно, в пленках  $n$ -типа образование ОС после предварительного освещения приводит к уменьшению отношения концентрации заряженных доноров к концентрации ОС <sup>6</sup>.

Предлагаемая нами модель, в которой учитывается влияние перекрытия уровней ОС на процессы рекомбинации, описывает не только ТГ, но и ряд других особенностей ФП, например, минимум ФП при изменении положения равновесного уровня Ферми путем легирования или ионной имплантации.

### Литература

1. *Mott N.F.* Phil. Mag. B, 1985, 51, 177.
2. *Street R.A.* Adv. Phys., 1981, 30, 593.
3. *Dersch H., Schweitzer I., Stuke J.* Phys. Rev. B, 1983, 28, 4678.
4. *Street R.A.* Phil. Mag. B, 1984, 49, L15.
5. *Stutzmann R., Jackson W.B., Tsai C.C.* Phys. Rev. B, 1985, 32, 23.
6. *Skumanich A., Amer N.M., Jackson W.B.* Phys. Rev. B, 1985, 31, 2263.