

Фотоиндуцированное изменение проводимости пленок аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием

© А.Г. Казанский[¶], Х. Мелл*, Е.И. Теруков⁺, П.А. Форш

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

* Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Physik,
D-35032 Marburg, Germany

⁺ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 23 декабря 2002 г. Принята к печати 27 декабря 2002 г.)

Исследовано изменение темновой проводимости пленок аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием, $a\text{-Si:H(Er)}$, в результате их предварительного освещения при комнатной температуре. Изучено влияние компенсирующей примеси бора на фотоиндуцированное изменение проводимости пленок $a\text{-Si:H(Er)}$. Установлено, что величина и знак изменения проводимости зависят от длительности освещения и положения уровня Ферми в щели подвижности. Рассмотрены возможные механизмы, приводящие к фотоиндуцированному изменению проводимости пленок $a\text{-Si:H(Er)}$.

Электро- и фотолюминесценция ионов редкоземельных элементов, помещенных в твердотельную матрицу, представляет интерес для создания оптоэлектронных приборов [1]. Ионы Er^{3+} люминесцируют на длине волны 1.54 мкм, которая попадает в окно прозрачности оптоволоконных линий связи. Использование кремния в качестве материала, содержащего Er^{3+} , позволяет интегрировать приборы электроники и оптоэлектроники в единой матрице. В последние годы особое внимание привлекают к себе пленки аморфного гидрированного кремния, легированного Er, $a\text{-Si:H(Er)}$. В работах [2,3] было показано, что люминесценция Er^{3+} в $a\text{-Si:H}$ существенно сильнее, а ее температурное гашение значительно слабее по сравнению с люминесценцией Er^{3+} в кристаллическом кремнии.

Несмотря на значительное число работ по люминесценции $a\text{-Si:H(Er)}$ (см., например, [3]), в настоящее время отсутствуют работы, посвященные изучению фотоиндуцированных изменений параметров данного материала (эффект Стеблера–Вронского). В то же время эти исследования важны для создания оптоэлектронных приборов на основе $a\text{-Si:H(Er)}$. Поэтому представляло интерес провести исследование влияния длительного освещения на проводимость пленок $a\text{-Si:H}$, легированных эрбием.

В работе исследованы пленки $a\text{-Si:H(Er)}$, полученные разложением моносилана (SiH_4) в высокочастотном тлеющем разряде. Пленки толщиной ~ 0.8 мкм осаждались на кварцевую подложку, имевшую температуру 250°C. Легирование пленок эрбием осуществлялось возгонкой при температуре 105°C металлорганического соединения $\text{Er}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)$, помещенного в вакуумную линию, соединенную с реакционной камерой [4]. В полученных пленках наблюдалась фотолюминесценция на длине волны 1.54 мкм. Для изменения положения уровня Ферми (E_F) в щели подвижности в ряд пленок помимо

эрбия вводился бор. Легирование бором проводилось добавлением диборана (B_2H_6) в реакционную камеру. Объемное отношение газов $k = [\text{B}_2\text{H}_6]/[\text{SiH}_4]$ составляло 10^{-5} и $3 \cdot 10^{-5}$. Полученные пленки имели проводимость n -типа. С ростом значения k положение уровня Ферми относительно края зоны проводимости ($E_c - E_F$) изменялось от 0.35 эВ ($k = 0$) до 0.5 эВ ($k = 3 \cdot 10^{-5}$) [4]. Измерения проводились в вакууме после отжига пленок в течение 15 мин при температуре 200°C.

Для всех исследованных пленок $a\text{-Si:H}$, легированного эрбием, наблюдалась долговременная составляющая релаксации фотопроводимости ($\Delta\sigma_{\text{ph}}$) после кратковременного (секунды) их освещения при энергиях фотонов в области $h\nu = 1.25\text{--}1.8$ эВ. В качестве примера на рис. 1 показана измеренная при различных температурах (T) релаксация во времени t фотопроводимости пленки с $k = 3 \cdot 10^{-5}$. Долговременная составляющая спада фотопроводимости удовлетворительно описывается растянутой экспонентой $\Delta\sigma_{\text{ph}}(t) \propto \exp[-(t/\tau)^\beta]$, где τ

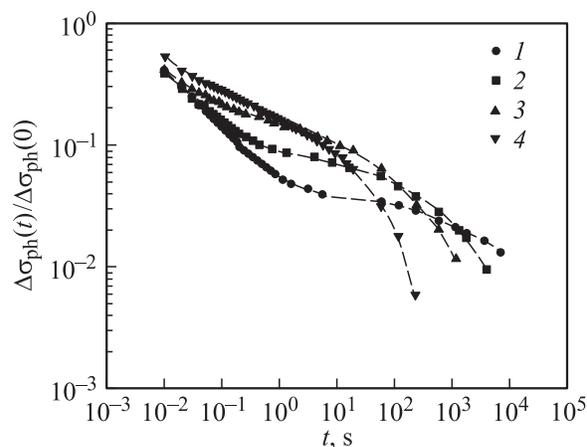


Рис. 1. Релаксация фотопроводимости пленки $a\text{-Si:H(Er, B)}$ ($k = 3 \cdot 10^{-5}$) при различных температурах. T, K : 1 — 300, 2 — 330, 3 — 360, 4 — 390.

[¶] E-mail: Kazanski@phys.msu.ru
Факс: (095) 939 37 31

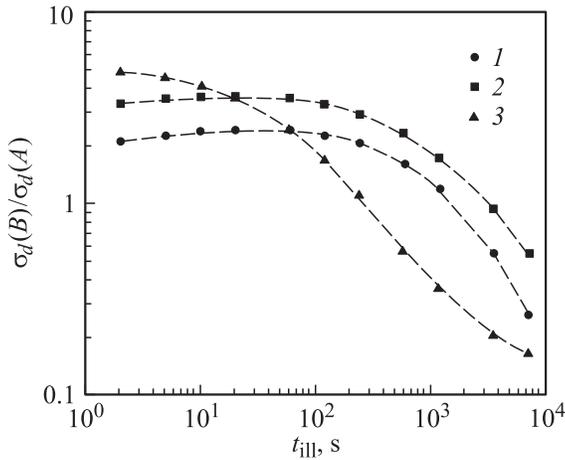


Рис. 2. Зависимости относительного изменения темновой проводимости исследованных пленок от времени их освещения при комнатной температуре от лампы накаливания с интенсивностью $P = 50 \text{ мВт/см}^2$. $k = 0$ (1), 10^{-5} (2), $3 \cdot 10^{-5}$ (3).

и β — параметры растянутой экспоненты, зависящие от температуры.

Известно, что остаточная фотопроводимость (ОФП) наблюдается в компенсированных пленках $a\text{-Si:H}$ n -типа проводимости [5], пленках $a\text{-Si:H}$, имеющих неоднородную структуру [6], а также в многослойных $p\text{-}n\text{-}p\text{-}n$ -структурах на основе $a\text{-Si:H}$ [7]. Для всех указанных материалов характерно наличие флуктуаций потенциала, которые должны разделять неравновесные носители заряда — электроны и дырки. В то же время, согласно [8], разделение носителей заряда флуктуациями потенциала не может привести к временам релаксации, достигающим десятков часов при комнатной температуре. По мнению автора [8], ОФП в материале на основе $a\text{-Si:H}$ n -типа проводимости может быть связана с разделением заряда и захватом дырок акцептороподобными центрами с последующей перестройкой их локальной конфигурации. Можно предположить, что модель ОФП, предложенная в работе [8], реализуется в пленках $a\text{-Si:H(Er)}$. Неоднородное распределение в пленках атомов Er и (или) их комплексов с кислородом ErO_δ , являющихся центрами донорного ($\delta < 1.5$) и акцепторного ($\delta > 1.5$) типа [9], а также с дефектами должно привести к появлению внутренних полей и разделению носителей заряда. При этом возможно появление акцепторных центров, изменяющих локальную конфигурацию в результате захвата неравновесных носителей — дырок.

На рис. 2 показана кинетика относительного изменения темновой проводимости $\sigma_d(B)/\sigma_d(A)$ пленок $a\text{-Si:H}$, легированных эрбием, в результате их освещения от лампы накаливания (плотность мощности $P = 50 \text{ мВт/см}^2$) при комнатной температуре; $\sigma_d(A)$ и $\sigma_d(B)$ — значения σ_d соответственно до освещения (в отожженном состоянии) и после освещения пленок в течение времени t_{ill} . Значения $\sigma_d(B)$ измерялись через 3 мин после прекращения освещения пленок.

Как видно из рисунка, при малых временах освещения $\sigma_d(B)/\sigma_d(A) > 1$ и слабо зависит от времени освещения. С увеличением времени освещения значение $\sigma_d(B)/\sigma_d(A)$ уменьшается и при больших t_{ill} становится меньше единицы. Наблюдаемая кинетика изменения $\sigma_d(B)/\sigma_d(A)$ указывает на существование двух процессов, определяющих изменение $\sigma_d(B)$ при малых и больших временах освещения. По-видимому, при малых t_{ill} увеличение σ_d в результате освещения связано с ОФП, рассмотренной выше. В то же время уменьшение σ_d при больших t_{ill} происходит вследствие увеличения плотности состояний, расположенных в середине щели подвижности. Можно предположить, что данные состояния возникают в результате реструктуризации центров, захватывающих неравновесные дырки и приводящих к возникновению ОФП. При этом скорость изменения $\sigma_d(B)$ со временем освещения должна зависеть от распределения плотности состояний в области смещения E_F и соответственно от уровня компенсации пленок бором [10].

Температурные зависимости темновой проводимости пленок в отожженном состоянии $\sigma_d \equiv \sigma_d(A)$ и после их освещения $\sigma_d \equiv \sigma_d(B)$ при комнатной температуре в течение 2 ч от лампы накаливания с интенсивностью $P = 50 \text{ мВт/см}^2$ представлены на рис. 3. Температурные зависимости темновой проводимости деградировавших пленок $\sigma_d(B)$ измерялись через 10 мин после прекращения освещения и при увеличении температуры со скоростью 2 град/мин. Для пленки $a\text{-Si:H(Er)}$, не содержащей бор, представлена также температурная зависимость $\sigma_d(B)$ после освещения пленки в течение 20 с. Стрелками показаны характерные температуры, при которых

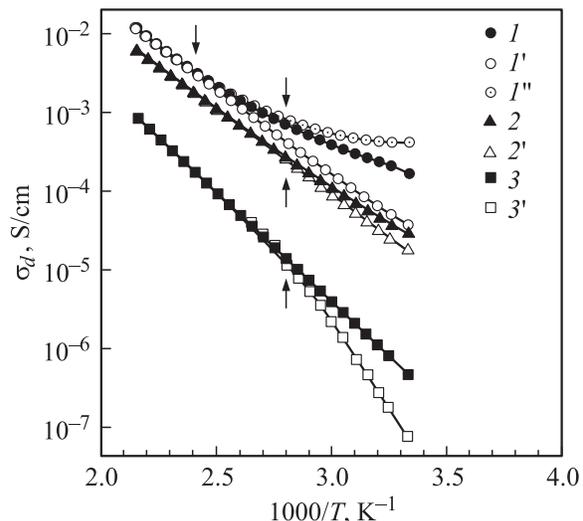


Рис. 3. Температурные зависимости темновой проводимости (σ_d) исследованных пленок в отожженном состоянии (1–3) и после их освещения от лампы накаливания с интенсивностью $P = 50 \text{ мВт/см}^2$ при комнатной температуре в течение 2 ч (1'–3') и 20 с (1''). Стрелками показаны характерные температуры отжига фотоиндуцированных изменений темновой проводимости. $k = 0$ (1, 1', 1''), 10^{-5} (2, 2'), $3 \cdot 10^{-5}$ (3, 3').

исчезают изменения проводимости, вызванные освещением. Как видно из рисунка, для пленки $a\text{-Si:H(Er)}$, не содержащей бор, изменения σ_d , вызванные освещением в течение малых t_{III} , исчезают при существенно меньших температурах (80–90°C) по сравнению с тем, когда пропадает эффект уменьшения σ_d , вызванный длительным освещением (140–150°C). Дополнительное введение бора также уменьшает характерные температуры отжига изменений проводимости, вызванных длительным освещением. По-видимому, это связано с увеличением подвижности атомов водорода, участвующих в процессе отжига фотоиндуцированных дефектов в пленках, содержащих атомы бора [11].

Таким образом, проведенные исследования показали, что освещение пленок $a\text{-Si:H}$ n -типа, легированного эрбием, приводит к изменению проводимости, величина и знак которого зависят от длительности освещения и положения уровня Ферми в щели подвижности. Сложная структура дефектов и комплексов, содержащихся в пленках $a\text{-Si:H(Er)}$, не позволяет в настоящее время идентифицировать состояния, ответственные за фотоиндуцированные изменения проводимости. Дополнительное введение бора в пленки Si:H(Er) существенно уменьшает характерную температуру отжига фотоиндуцированного изменения проводимости.

Работа выполнена в рамках проекта „Университеты России — 2002“.

Список литературы

- [1] *Rare Earth Doped Semiconductors*, ed. by G.S. Pomrenke, P.B. Klein and D.W. Langer (Materials Research Society, Pittsburgh, 1993) [MRS Symp. Proc., **301** (1993)].
- [2] W. Fuhs, I. Ulber, G. Weiser, M.S. Bresler, O.B. Gusev, A.N. Kuznetsov, V.Kh. Kudoyarova, E.I. Terukov, I.N. Yassievich. *Phys. Rev. B*, **56**, 9545 (1997).
- [3] H. Kühne, G. Weiser, E.I. Terukov, A.N. Kuznetsov, V.Kh. Kudoyarova. *J. Appl. Phys.*, **86**, 896 (1999).
- [4] A.G. Kazanskii, H. Mell, G. Weiser, E.I. Terukov. *J. Non-Cryst. Sol.*, **299–302**, 704 (2001).
- [5] J.K. Rath, W. Fuhs, H. Mell. *J. Non-Cryst. Sol.*, **137–138**, 279 (1991).
- [6] S.-H. Choi, G.-L. Park, C. Lee, J. Yang. *Sol. St. Commun.*, **59**, 177 (1986).
- [7] J. Kakalios, H. Fritzsche. *MRS Symp. Proc.*, **37**, 29 (1985).
- [8] J. Kakalios. *Phil. Mag. B*, **54**, 199 (1986).
- [9] C. Piamonteze, A.C. Iniguez, L.R. Tessler, M.C. Martin Alves, H. Tolentino. *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 4652 (1998).
- [10] А.Г. Казанский. *ФТП*, **24**, 556 (1990).
- [11] W. Beyer, J. Herion, H. Wagner. *J. Non-Cryst. Sol.*, **114**, 217 (1989).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoinduced conductivity change in erbium-doped amorphous hydrogenated silicon films

A.G. Kazanskii, H. Mell*, E.I. Terukov⁺, P.A. Forsh

Department of Physics,
M.V. Lomonosov Moscow State University,
119899, Moscow, Russia

* Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Physik,
D-35032, Marburg, Germany

⁺ Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Change in the dark conductivity of erbium-doped amorphous hydrogenated silicon ($a\text{-Si:H(Er)}$) films after their preliminary light treatment at room temperature has been investigated. The boron compensation influence on the photoinduced conductivity change of $a\text{-Si:H(Er)}$ has been studied. It was found that the value and the sign of conductivity change depend on the temperature and Fermi level position. Possible mechanisms of the photoinduced conductivity change of $a\text{-Si:H(Er)}$ films are considered.