

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.315.592

**ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТА СТЕБЛЕРА–ВРОНСКОГО
ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ВЫСОКООМНЫХ
НЕЛЕГИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ α -Si:H**

И. А. Курова, Н. Н. Ормонт

(кафедра физики полупроводников)

E-mail: scon282@phys.msu.su

При температурах $T > 400$ К обнаружен аномальный эффект Стеблера–Вронского в высокоомных нелегированных пленках α -Si:H — монотонное возрастание темновой проводимости и фотопроводимости при освещении и немонотонное изменение проводимости после освещения. Немонотонная релаксация проводимости описывается суммой двух растянутых экспонент с разными параметрами τ и E . Показано, что обнаруженный эффект можно объяснить образованием двух типов метастабильных состояний — оборванных связей кремния и электрически активных атомов неконтролируемой примеси донорного типа.

Эффект Стеблера–Вронского в пленках α -Si:H — обратимое уменьшение темновой проводимости и фотопроводимости при освещении — связан с образованием метастабильных состояний в запрещенной зоне. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию этого эффекта [1–3], вопрос о природе и механизмах образования и релаксации метастабильных состояний (МС) в α -Si:H в

настоящее время полностью не решен. Эта проблема важна не только с научной, но и с практической точки зрения, поскольку она связана с проблемой стабильности приборов на основе α -Si:H.

До настоящего времени исследования нелегированных пленок α -Si:H проводились в основном при комнатных температурах. Было установлено, что при освещении пленок образуются метастабильные

оборванные связи кремния, в результате чего темновая проводимость (ТП) и фотопроводимость (ФП) уменьшаются во время освещения и возрастают до равновесной величины после его отключения [1–3]. В легированных пленках α -Si:H было обнаружено, что при температурах выше комнатных в процессе освещения идет образование двух типов МС — оборванных связей кремния и электрически активных атомов примеси [4–7]. Это обуславливает более сложную немонотонную кинетику изменения ТП и ФП легированных пленок во время и после освещения; при этом быстрые процессы изменения ТП и ФП связаны с образованием и релаксацией метастабильных оборванных связей кремния, а медленные — электрически активных атомов примеси.

В настоящей работе обнаружен аномальный эффект Стеблера–Вронского в высокоомных нелегированных пленках α -Si:H при повышенных температурах — монотонное увеличение ТП и ФП во время освещения и немонотонное изменение ТП после освещения — и проведено исследование температурных зависимостей эффекта с целью установления его природы.

Исследованные в работе пленки α -Si:H были получены в лабораториях ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (С.-Петербург) и ГИРЕДМЕТА (Москва) методом осаждения в плазме высокочастотного тлеющего разряда при температуре подложки 250°C. Отожженные при 190°C в течение часа и медленно охлажденные пленки α -Si:H имели высокую фоточувствительность (при комнатной температуре $k = \sigma_{ph}/\sigma_d = (1-2) \cdot 10^6$, где σ_{ph} и σ_d — величины соответственно ФП и ТП), и энергии активации ТП этих пленок составляли 0.87–0.88 эВ. Пленки освещались белым светом от галогенной лампы интенсивностью 80 мВт·см⁻² с ИК-фильтром.

Изменение величины σ_d/σ_{d0} для пленки 1 в процессе освещения при температурах 400, 411 и 425 К (σ_{d0} — величина ТП пленки, отоженной и медленно охлажденной до температуры измерения), а также величины $\sigma_{ph}/\sigma_{ph}(0)$ для этой же пленки при $T = 425$ К показано на рис. 1, а. Видно, что во всех случаях ТП и ФП монотонно увеличиваются при возрастании времени освещения. Аналогичные зависимости наблюдаются также для других пленок. Можно предположить, что в наших пленках образуются метастабильные оборванные связи выше уровня Ферми. Это приводит к смещению уровня Ферми вверх и увеличению ТП и ФП. Данное предположение согласуется с тем, что в исследованных пленках уровень Ферми лежит вблизи середины запрещенной зоны.

Однако релаксация ТП освещенной пленки после отключения света имеет немонотонный характер: вначале ТП быстро увеличивается, а затем медленно уменьшается (рис. 1, б). Такая кинетика релаксации ТП не согласуется с высказанным выше

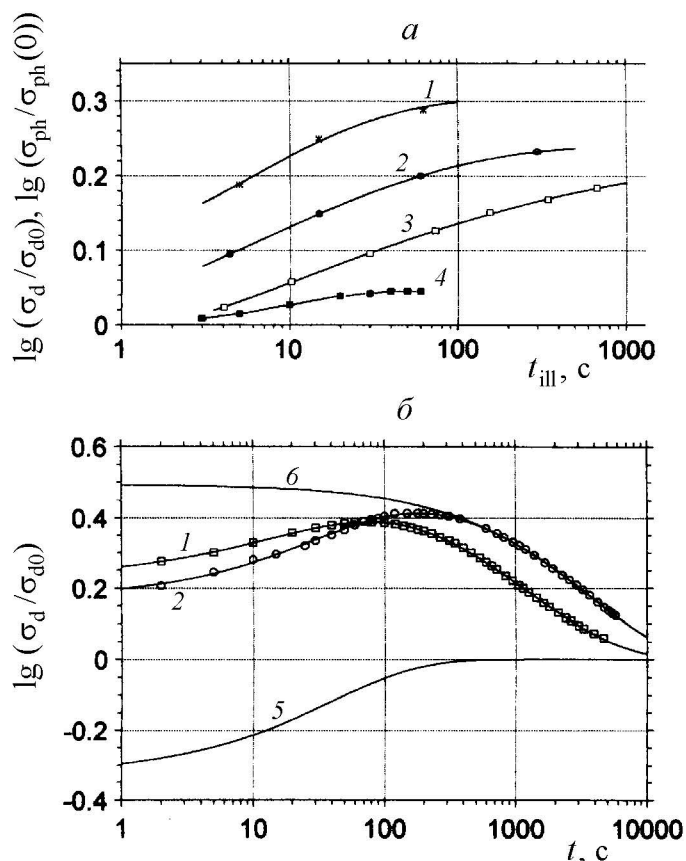


Рис. 1. Изменение приведенной темновой проводимости σ_d/σ_{d0} при $T \geq 400$ К (1, 3) и фотопроводимости $\sigma_{ph}/\sigma_{ph}(0)$ при $T = 425$ К (4) одной из исследованных пленок α -Si:H (№ 1) во время освещения (а) и после отключения освещения ($t_{ill} = 60$ с) — (б): $T = 425$ (1), 411 (2) и 400 К (3); 5 и 6 — растянутые экспоненты, сумма которых соответствует кривой 2 на рис. б

предположением об образовании при освещении одного типа МС выше уровня Ферми. По-видимому, под действием освещения в пленке образуются два типа МС — быстрые и медленные. Наблюдаемое медленное монотонное возрастание ТП при освещении (см. рис. 1, а) отражает образование медленных МС. Об образовании же быстрых МС можно судить по наличию начального участка возрастания ТП пленки после отключения освещения (см. рис. 1, б), который соответствует отжигу быстрых МС.

Для проверки сделанных предположений были проведены измерения кинетики ТП пленки при более низких температурах. На рис. 2 показана кинетика изменения величины σ_d/σ_{d0} пленки 1 во время освещения при температурах ниже 400 К. Временные зависимости ТП в этом случае отличаются от представленных на рис. 1, а и имеют немонотонный характер: наблюдается быстрое уменьшение, а затем медленное возрастание ТП. Это указывает на образование двух типов МС. Скорость увеличения ТП на временном участке, соответствующем образованию медленных МС, быстро возрастает с температурой (см. рис. 2). Кроме того, при $T = 380$ К (рис. 2, кривая 4) уменьшение ТП, связанное с образованием быстрых МС, проявляется слабо, что

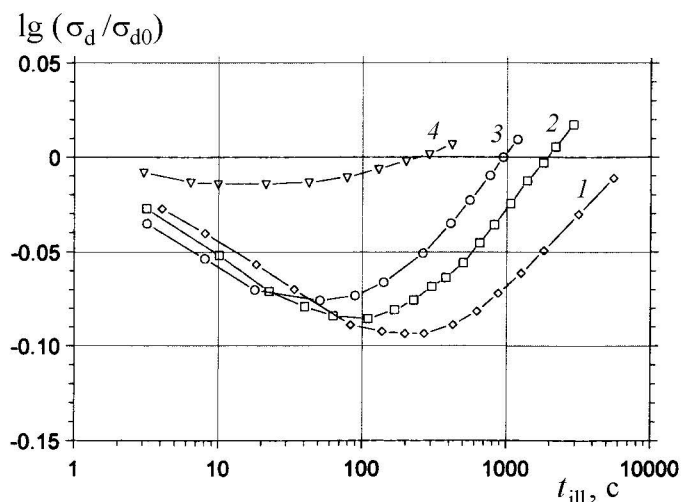


Рис. 2. Изменение приведенной темновой проводимости σ_d/σ_{d0} пленки 1 во время освещения при $T < 400$ К: $T = 342$ (1), 359 (2), 366 (3) и 380 К (4)

может быть обусловлено и процессом термического отжига быстрых МС. Таким образом, ТП пленки в области температур $T > 400$ К может монотонно увеличиваться со временем освещения, что и наблюдалось на исследованных пленках (см. рис. 1, а).

Для установления природы быстрых и медленных МС были определены их параметры релаксации. Как и в работе [7], для описания кинетики релаксации МС мы используем соотношение $N(t) \sim \lg(\sigma_d/\sigma_{d0})$, где N — концентрация МС. Немонотонную кинетику релаксации МС мы представляем как сумму растянутых экспонент, отвечающих релаксации двух типов МС — быстрых и медленных:

$$\lg(\sigma_d/\sigma_{d0}) = a_1 \exp\left\{-(t/\tau_1)^{\beta_1}\right\} + a_2 \exp\left\{-(t/\tau_2)^{\beta_2}\right\},$$

где $\tau_{1,2} = \nu_{1,2}^{-1} \exp(E_{1,2}/kT)$, а $E_{1,2}$ — величина, которую называют иногда энергией отжига.

На рис. 1, б кривая немонотонной релаксации МС (2) представлена в виде суммы двух растянутых экспонент: кривой 5 (релаксация быстрых МС) и кривой 6 (релаксация медленных МС).

Температурные зависимости параметров τ_1 и τ_2 , определенных из кинетики релаксации ТП двух исследованных пленок после отключения освещения (рис. 3), имеют активационный характер, причем для обеих пленок соблюдаются соотношения $\tau_1 < \tau_2$ и $E_1 < E_2$. Существенное различие параметров τ и E указывает на разную природу быстрых и медленных МС в исследованных пленках.

Итак, образование быстрых МС приводит к уменьшению ТП пленок, причем быстрые МС имеют меньшую энергию отжига E_1 . Это позволяет предположить, что быстрые МС представляют собой оборванные связи кремния. Образование медленных МС приводит к увеличению ТП, и их релаксация характеризуется энергией отжига E_2 , превышающей E_1 , что указывает на связь образования

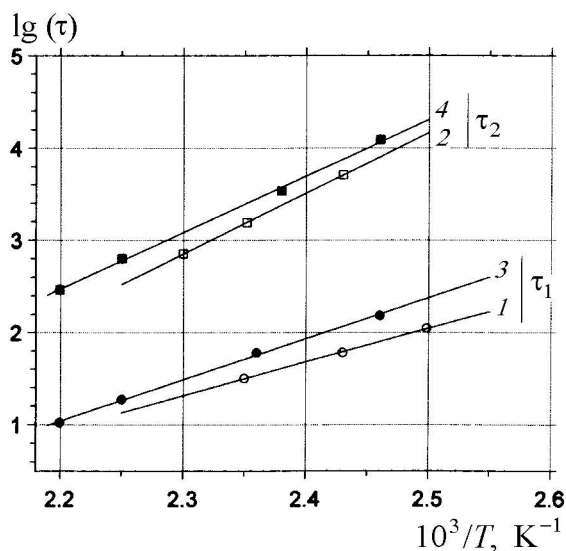


Рис. 3. Температурные зависимости времен релаксации быстрых (1, 3) и медленных (2, 4) метастабильных состояний в пленках 1 (1, 2) и 2 (3, 4) при длительности предварительного освещения $t_{ill} = 60$ с. Энергия отжига быстрых (E_1) и медленных (E_2) МС для пленки 1: $E_1 = 0.73$ эВ, $E_2 = 1.32$ эВ и для пленки 2: $E_1 = 0.89$ эВ, $E_2 = 1.22$ эВ

медленных МС с активацией электрически неактивных неконтролируемых донорных примесей, имеющих в исследованных пленках. Возможно, такой примесью является кислород, обычно содержащийся в пленках a -Si:H в концентрациях, больших, чем 10^{18} см $^{-3}$ [8]. В работе [9] было установлено, что при увеличении концентрации фосфора в пленках a -Si:H их ФП возрастает. Соответственно, наблюдавшееся нами увеличение ФП исследованных пленок при освещении указывает на возможность повышения степени легирования пленок неконтролируемыми примесями в результате освещения при высоких температурах.

Таким образом, обнаруженный в работе аномальный эффект Стеблера-Вронского в высокоомных нелегированных пленках a -Si:H при высоких температурах ($T > 400$ К) (увеличение темновой проводимости и фотопроводимости во время освещения и немонотонная релаксация темновой проводимости после отключения освещения) можно объяснить возникновением двух типов МС с разными временами и энергиями образования и релаксации МС. Этими МС могут быть оборванные связи кремния и электрически активные атомы неконтролируемых примесей донорного типа.

Авторы благодарны Е.И. Терукову и А.Н. Лупачевой за предоставление образцов и И.П. Звягину за обсуждение результатов работы.

Работа поддержана программой «Университеты России — фундаментальные исследования».

Литература

1. Staebler D.L., Wronski C.R. // Appl. Phys. Lett. 1977. **31**. P. 292.

2. Dersch H., Schweitzer L., Stuke J. // Phys. Rev. 1983. **B28**. P. 4678.
3. Stutzmann M., Jackson W.B., Tsai C.C. // Phys. Rev. 1985. **B32**. P. 23.
4. Dong X.M., Fritzsche H. // Phys. Rev. 1987. **B36**. P. 9778.
5. Jang J., Park S.C., Kim S.C., Lee C. // Appl. Phys. Lett. 1987. **51**. P. 1804.
6. Wang S.L., Taylor P.C. // Solid State Commun. 1995. **95**. P. 361.
7. Курова И.А., Ларина Э.В., Ормонт Н.Н., Сенашенко Д.В. // ФТП. 1997. **31**. С. 1455.
8. Stutzmann M., Jackson W.B., Tsai C.C. // Phys. Rev. 1986. **B34**. P. 63.
9. Chen L., Tauc J., Kocka J., Stuchlik J. // Phys. Rev. 1992. **B46**. P. 2050.

Поступила в редакцию
13.03.01

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.46

О ВЛИЯНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА МАЛЫЕ ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ В ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ

Ю. Г. Пыркин, В. П. Петров, И. Н. Иванова, М. А. Силаев

(кафедра физики моря и вод суши)

E-mail: silaevma@mail.ru

Экспериментально исследовано взаимодействие мельчайших частиц водной суспензии с турбулентностью, созданной колеблющейся решеткой. Разность дисперсий пульсации модуля скорости течения в чистой воде и суспензии сопоставлена с основными энергетическими параметрами твердых частиц.

Перенос твердых частиц турбулентными потоками жидкости определяется как энергетическими характеристиками самих потоков, так и параметрами частиц. Считается, что скорость переноса взвешенных частиц, имеющих чрезвычайно малый размер, совпадает со скоростью потока жидкости [1–5], т.е. их влияние на распределения скорости течения, интенсивности турбулентности и другие параметры не учитывается.

Другими словами, не учитывается энергия, которая, несомненно, должна затрачиваться на поддержание твердых, хотя и очень малых частиц во взвешенном состоянии [6], т.е. на замедление скорости их осаждения по сравнению со стоковой. Согласно исследованиям авторов, в потоках с термохалинной стратификацией интенсивность турбулентности в зонах генерации была большей, чем в суспензионных потоках при той же степени стратификации и числе Рейнольдса потока [7].

Следовательно, для уточнения физических механизмов, отвечающих за процесс взаимодействия турбулентности и мельчайших твердых частиц в суспендированной жидкости, недостаточно рассматривать ее как континуум, т.е. подобие сплошной среды [5, 8, 9]. Необходимы совместные комплексные исследования основных характеристик и в суспензии и в жидкости в отсутствие твердых частиц. Однако в настоящее время подобных исследований практически нет, а результаты «пионерских»

экспериментальных и теоретических работ весьма противоречивы [1, 2, 4–6, 10].

Влияние турбулентности на суспензию исследовалось нами на лабораторной установке [11, 12], в которой турбулентность генерируется колеблющейся с разными амплитудами и частотами решеткой. Решетка изготовлена из брусков органического стекла сечением 1×1 см с расстояниями между центрами брусков 2.8 см. Частота колебаний решетки может изменяться от 0.3 до 2 Гц, амплитуда колебаний в начальном цикле экспериментов была постоянной [12]. Согласно теории [13], интенсивность турбулентности, создаваемой колеблющейся решеткой (подобной той, что используется в наших экспериментах), определяется частотой и амплитудой колебаний решетки, ее геометрией и вязкостью жидкости. В нашем случае (при концентрациях твердых частиц в суспензии менее 1 мг/см^3) ее вязкость сравнима с молекулярной вязкостью чистой воды при той же температуре [8, 9].

Установка оснащена измерительной системой для регистрации модуля скорости течения и пробоотборниками для взятия проб жидкости. Эксперименты проводились в чистой воде, солевом растворе и в водной суспензии, содержащей илистые частицы размером до 30 мкм. По значениям регистрируемого модуля скорости течения на разных уровнях от колеблющейся решетки вычислялись дисперсии D пульсаций скорости течения. За начало отсчета