

Проводимость и структура пленок аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием $a\text{-Si:H(Er)}$

© О.И. Коньков, Е.И. Теруков, Л.С. Границына

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

(Получена 2 апреля 2002 г. Принята к печати 25 апреля 2002 г.)

Проведенные исследования показали, что структура пленки $a\text{-Si:H(Er)}$, используемой в качестве рабочего слоя в электролюминесцентной структуре, является столбчатой. Диаметры столбов лежат в интервале 60–100 Å. Проводимость в такой структуре различается в зависимости от направления тока. При комнатной температуре в планарной геометрии транспорт осуществляется с помощью механизма перескоков по локализованным состояниям вблизи края зоны проводимости, в пределах „хвоста“ зоны. В сэндвич-геометрии проводимость осуществляется по границам столбов, где проводимость выше, по механизму прыжковой проводимости на уровне Ферми.

В последние годы значительные усилия исследователей сосредоточены на получении и исследовании аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием $a\text{-Si:H(Er)}$. Этот интерес объясняется перспективностью использования этого материала для целей волноводной оптики и телекоммуникаций. В связи с этим основное внимание уделяется изучению люминесцентных свойств аморфного кремния при длине волны 1.54 мкм. Но если активность исследований и количество работ, посвященных фотолюминесцентным свойствам $a\text{-Si:H(Er)}$ довольно значительны (см., например, [1–4]), то этого нельзя сказать об исследовании электролюминесценции структур на основе $a\text{-Si:H(Er)}$. Хотя электролюминесценция и наблюдается [5,6], но ее эффективность совершенно недостаточна для практического использования. Прогресс в этой области тормозит скудность исследований именно электрических свойств. Неудовлетворительно решены вопросы механизма электролюминесценции в такой системе, токопрохождения, контактных явлений, не построены зонные диаграммы и т. д.

Предлагаемая работа как раз и направлена на решение одного из таких вопросов. В ней представлены результаты исследования электрических характеристик магнетронных пленок $a\text{-Si:H(Er)}$: проводимости и ее температурной зависимости, в том числе и в геометрии электролюминесцентной структуры.

1. Технология и техника эксперимента

Пленки аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием, $a\text{-Si:H(Er)}$ готовились методом магнетронного распыления металлического эрбия в силан-содержащей атмосфере (MASD) [7]. В данном исследовании параметры технологического процесса составляли: исходная газовая смесь (12.5% $\text{SiH}_4 + 37.5\% \text{H}_2 + 50\% \text{Ar}$), величина магнитного поля 80 мТ; анодное напряжение 600 В; плотность мощности заряда 0.2 Вт/см²; суммарное давление газовой смеси $4 \cdot 10^{-3}$ Торр. Для легирования эрбием использовался металлический эрбий чистотой 99.99 в виде фоль-

ги. Пленки толщиной 0.3–0.6 мкм наносились на подложки кристаллического кремния n -типа для изготовления структур $\text{Al}/n^+a\text{-Si:H}/a\text{-Si:H(Er)}/n^+a\text{-Si:H}/\text{Al}$ при измерении в сэндвич-геометрии и полированного кварца для измерения проводимости в планарной геометрии $\text{Al}/a\text{-Si:H(Er)}/\text{Al}$. Сильно легированный слой аморфного кремния $n^+a\text{-Si:H}$ создавался методом ВЧ разложения смеси силана и фосфина. Al-контакты создавались термическим испарением. Измерения проводимости в сэндвич-геометрии проводились на омическом участке ВАХ при напряжении 100 мВ. Измерения проводимости в планарной геометрии проводились при фиксированном напряжении 10 В. Содержание эрбия в пленке определялось из спектров резерфордовского обратного рассеяния и составляло $(6 \cdot 10^{20} - 1.3 \cdot 10^{21}) \text{см}^{-3}$. Концентрационный профиль эрбия по толщине пленки $a\text{-Si:H(Er)}$ был примерно постоянным и не выходил за указанные пределы. Ширина запрещенной зоны, определенная оптическими методами, составляла 1.7–1.8 эВ.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Планарная геометрия

На рис. 1 представлена характерная температурная зависимость темновой проводимости исследованных образцов. При температурах более $T_c = 85^\circ \text{C}$ энергия активации проводимости составляет 0.66 эВ, для более низких температур ≈ 0.48 эВ с разбросом значений для разных образцов не более 0.04 эВ. Величина проводимости при температуре T_c составляет $\approx 8 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

Такое изменение энергии активации позволяет нам полагать, что в данной геометрии для температур более T_c транспорт носителей заряда осуществляется по делокализованным состояниям выше края подвижности. Но $a\text{-Si:H(Er)}$ — это полупроводник n -типа [8], так что проводимость определяется транспортом электронов, захватывает уровни энергии в верхней части запрещенной

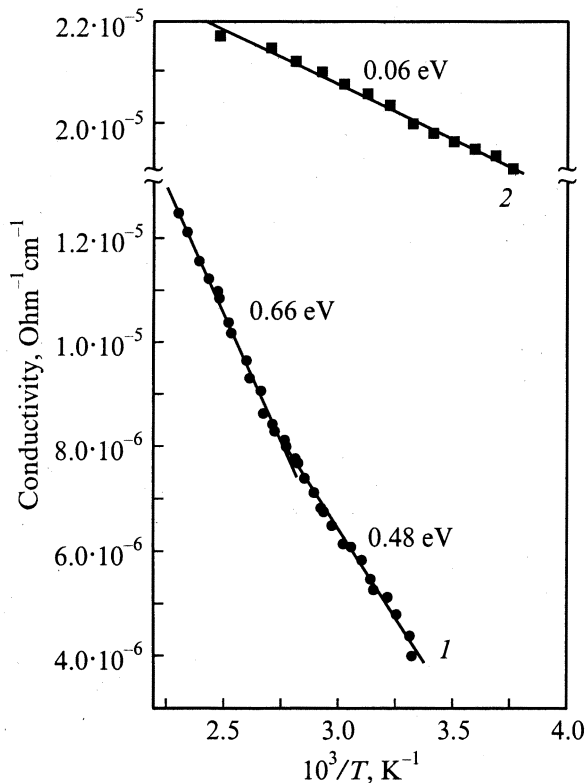


Рис. 1. Зависимость темновой проводимости от обратной температуры для пленки $a\text{-Si:H(Er)}$ в условиях планарной (1) и сэндвич-структуры (2). Показаны экспериментальные точки, аппроксимирующие прямые и значения энергий активации.

зоны и за край подвижности в этом случае можно принять край зоны проводимости E_c .

Для температур менее T_c транспорт осуществляется с помощью механизма перескоков по локализованным состояниям вблизи края зоны проводимости, в пределах „хвоста“ зоны. И при температуре $T = T_c$ наблюдается смена механизма проводимости.

Совершенно аналогичное поведение проводимости описано авторами [9], но для чистого аморфного кремния низкого качества с большой плотностью локализованных состояний в щели подвижности, полученного методом высокочастотного разложения силана. Полученный нами материал, в связи с очень большим уровнем легирования эрбием (порядка 10^{21} см^{-3}), также обладает высокой плотностью указанных состояний. Оценки, выполненные методом фототермического отклонения [10], дают величину плотности локализованных состояний порядка $10^{19} - 10^{20} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-3}$

Тогда проводимость может быть представлена следующим выражением:

$$\sigma = \sigma_1 \exp[-(E_c - E_f)/kT] + \sigma_2 \exp[-(E_a - E_f + W)/kT],$$

где первое слагаемое описывает проводимость по делокализованным состояниям, второе — проводимость в пределах хвоста зоны проводимости, E_a — характеристическая энергия, соответствующая концу хвоста

плотности локализованных состояний зоны проводимости, W — энергия перескока. При этом с точки зрения теории совершенно безразлично, существует ли хвост плотности состояний, заканчивающийся при энергии E_a , или же при этой энергии существует пик плотности локализованных состояний с шириной $2W$ [11]. Полагая $W = 0.08 \text{ эВ}$, что соответствует энергии перескока электронов для аморфного кремния с плотностью локализованных состояний порядка $10^{19} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-3}$ [12–14], и используя наблюдаемую величину разности наклонов до и после T_c , получаем $E_c - E_a - W = 0.18 \text{ эВ}$ и $E_c - E_a = 0.26 \text{ эВ}$. Последняя величина — это ширина области локализованных состояний около края зоны проводимости (хвоста) или расстояние от края зоны проводимости до пика плотности локализованных состояний.

2.2. Сэндвич-геометрия

Проводимость в такой геометрии разительно отличается от проводимости в планарной геометрии. Это обнаруживается в температурной зависимости проводимости — энергия активации составляет 0.06 эВ (рис. 1) с разбросом около 0.01 эВ для разных образцов. Причем эта энергия почти не зависит от направления тока через структуру. Но самое интересное, что эта энергия постоянна во всем исследованном температурном интервале и не изменяется при переходе через T_c . Величина проводимости при комнатной температуре составляет $\approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

В силу малости значения энергии активации и отсутствия изломов на графике температурной зависимости проводимости мы полагаем, что в данной геометрии наблюдается перескоковый механизм проводимости около уровня Ферми, а энергия активации проводимости соответствует энергии перескока. Близкое значение энергии активации в перескоковом режиме проводимости наблюдалось нами ранее в аморфном кремнии с плотностью локализованных состояний на уровне Ферми порядка $10^{20} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-3}$ [14]. Перехода к прыжковому механизму с переменной длиной прыжка и зависимостью $\sigma \propto T^{-1/4}$ в нашем исследовании не наблюдается.

2.3. Просвечивающая электронная микроскопия

На рис. 2 представлена фотография исследуемой нами пленки $a\text{-Si:H(Er)}$, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Наряду с общей неоднородностью ясно видна структура, которую можно представить как мозаичную с характерным размером элемента порядка $60 - 100 \text{ \AA}$. Аналогичная структура наблюдается для $a\text{-Si:H}$, полученного распылением в атмосфере водорода в [15]. В частности, в работе обнаружена связь, микроструктуры с характерным размером 100 \AA , различаемой методом ПЭМ, с существованием структурных неоднородностей в виде столбов,

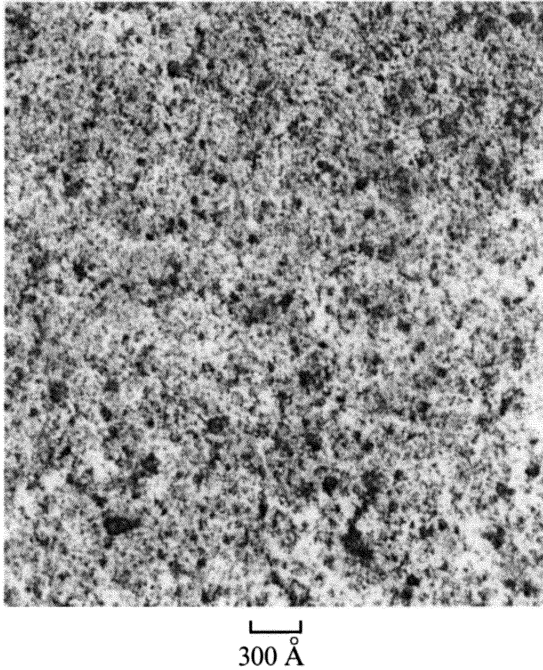


Рис. 2. Фотография пленки $a\text{-Si:H(Er)}$, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии.

обнаруживаемых с помощью растрового электронного микроскопа на изломе пленки. Более того, существование флуктуаций плотности, обнаруживаемых с помощью ПЭМ, всегда связано со столбчатой структурой пленки [16,17].

Аналогия в методах получения и результатах ПЭМ в нашем исследовании и указанных выше позволяет предположить столбчатость структуры исследуемой нами пленки $a\text{-Si:H(Er)}$ с диаметром столба 60–100 Å.

2.4. Обсуждение результатов

Различие в механизмах проводимости вдоль и поперек пленки свидетельствует о неоднородности структуры. Неоднородность может быть или параллельной подложке — слоистость структуры, или перпендикулярной ей — столбчатость структуры. Более сложные случаи комбинации указанных неоднородностей, например случаи прерывания столбов, рассматривать не будем. Привлечение двух обнаруженных фактов — омичности проводимости, что показывает на отсутствие потенциальных барьеров, и большей величины проводимости в сэндвич-структуре ($2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ против $(4\text{--}5) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$) — позволяет сделать выбор в пользу столбчатой структуры.

Данные ПЭМ позволяют отвергнуть предположение о том, что структура пленки представляет собой однородную матрицу материала одного состава и свойств со столбчатыми вкраплениями материала другого состава и свойств. Последняя модель также позволила бы объяснить данные по проводимости. Однако в ПЭМ мы на-

блюдаем только структуру непосредственно граничащих друг с другом столбов. Матрица не наблюдается.

Таким образом, мы предполагаем, что структура исследуемой нами пленки представляет собой набор непосредственно граничащих друг с другом столбов, характерный диаметр которых лежит в интервале 60–100 Å.

Соответствующая зонная диаграмма представлена на рис. 3. Изображен один столб и граница между соседними столбами.

В планарной геометрии проводимость определяется глубиной залегания уровня Ферми E_f в середине столба 0.66 эВ и пиком плотности состояний E_a на расстоянии 0.26 эВ от края зоны проводимости. Обе энергии можно соотнести с уровнями, связанными с эрбием, так как, во-первых, энергия активации проводимости для пленок $a\text{-Si:H}$, полученных тем же методом, но без эрбия, составляет 0.8 эВ [18], а во-вторых, как в кристаллическом [19,20], так и в аморфном [21] кремнии обнаружены центры, связанные с эрбием, с энергиями 0.2–0.36 и 0.55–0.6 эВ. Границы столбов при таком механизме проводимости не оказывают влияния.

В сэндвич-геометрии проводимость осуществляется по границам столбов, где проводимость выше.

Увеличение проводимости и изображенный на рисунке изгиб зон можно объяснить следующими соображениями. При росте пленки $a\text{-Si:H(Er)}$ происходит сегрегация эрбия на границах столбов. Хотя непосредственно в аморфном кремнии такого эффекта пока не наблюдалось, но он обнаружен в неоднородной структуре $c\text{-Si}/a\text{-Si}$, содержащей эрбий [22]. Пик концентрации Er лежит в объеме аморфного кремния на расстоянии единиц нанометров от границы $c\text{-Si}/a\text{-Si}$ и резко обрывается в глубь объема аморфного кремния. Соответственно область с повышенной концентрацией Er, которую следует отнести к границе столба, также имеет размеры порядка единиц нанометров. Увеличение концентрации эрбия приводит к увеличению плотности локализованных состояний, в том числе и при энергии 0.26 эВ. Особенно сильно этот эффект будет проявляться у границы

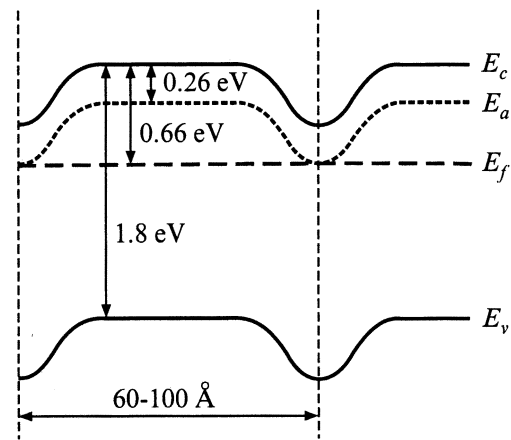


Рис. 3. Зонная диаграмма. Показан объем столба и граница между соседними столбами.

столбов и может иметь результатом закрепление уровня Ферми на границе при указанной энергии.

Сравнение величин проводимостей в середине столба и на границе в соответствии с выражениями для проводимости в хвосте зоны и прыжковой проводимости соответственно [23] показывает, что проводимость по границе превышает проводимость по столбу вплоть до температур порядка 500 К. Вычисления проведены в предположении, что радиус локализации волновой функции составляет 3 \AA , энергии активации прыжков составляют 0.08 и 0.06 эВ для столба и границы соответственно, плотности состояний составляют 10^{19} и $10^{20} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Таким образом, поскольку проводимость по границам столбов выше, а размеры областей, соответствующих границе столба и оставшейся части, сравнимы, то в исследованном температурном интервале в сэндвич-геометрии мы наблюдаем прыжковую проводимость в пределах границ столбов.

В подтверждение такого вывода приведем результаты измерения проводимости в реальных электролюминесцентных структурах $\text{Al}/a\text{-Si:H(Er)}/c\text{-Si}/\text{Al}$, где в качестве $c\text{-Si}$ использовались пластины КЭФ-5 (n -типа, удельное сопротивление $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), КДБ-7.5 (p -типа, $7.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) и ЭКЭС-0.01 (эпитаксиальный n -типа, $0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Измерения проводились в омическом режиме при напряжении на структуре менее 0.2 В. Измеренные значения энергий активации проводимости составили 0.22, 0.24 и 0.09 эВ соответственно. В таких структурах ток течет последовательно через пленку аморфного кремния и через кристаллическую подложку. Тогда измеренная энергия активации должна соответствовать большему из значений для пленки или подложки. Действительно, полученные значения энергий активации можно соотнести со значениями для кристаллической подложки 0.18, 0.22 и 0.01 эВ соответственно для указанных выше типов подложек, т. е. для высокоомных подложек проводимость структуры определяется именно подложкой, для низкоомных — пленкой аморфного кремния. И величина энергии активации проводимости для пленки $a\text{-Si:H(Er)}$ составляет не более 0.09 эВ, что соответствует измерениям на структуре $\text{Al}/n^+a\text{-Si:H}/a\text{-Si:H(Er)}/n^+a\text{-Si:H}/\text{Al}$ и подтверждает наши выводы.

3. Заключение

Проведенные нами исследования показали, что структура пленок $a\text{-Si:H(Er)}$, получаемых методом магнетронного распыления и используемых в качестве рабочего слоя в электролюминесцентной структуре, является столбчатой. Диаметры столбов лежат в интервале 60–100 \AA . Проводимость в такой структуре различается в зависимости от направления тока. В планарной геометрии проводимость определяется глубиной залегания уровня Ферми в середине столба 0.66 эВ и пиком плотности состояний на расстоянии 0.26 эВ от края зоны проводимости. Для температур более 85° C транспорт

носителей заряда осуществляется по делокализованным состояниям выше края подвижности. Для более низких температур транспорт осуществляется с помощью механизма перескоков по локализованным состояниям вблизи края зоны проводимости, в пределах хвоста зоны с захватом на уровень 0.26 эВ. В сэндвич-геометрии проводимость осуществляется по границам столбов, где проводимость выше, по механизму прыжковой проводимости на уровне Ферми.

Структура на основе $a\text{-Si:H(Er)}$, обладающая электролюминесцентными свойствами, выполняется в сэндвич-геометрии. Поэтому при анализе механизмов и способов возбуждения ЭЛ следует учитывать наши результаты о зонной структуре, о механизмах и величине проводимости.

Авторы благодарят А.А. Ситникову за проведение микроскопических измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 01-02-17825; технологическая часть работы выполнена при поддержке частного лица.

Список литературы

- [1] M.S. Bresler, O.B. Gusev, V. Kh. Kudoyarova. Appl. Phys. Lett., **67**, 3599 (1995).
- [2] J.H. Shin, R. Serna, G.N. van den Hoven. Appl. Phys. Lett., **68**, 997 (1996).
- [3] A.R. Zanatta, Z.A. Nunes, L.R. Tessler. Appl. Phys. Lett., **70**, 997 (1997).
- [4] *Rare Earth Doped Semiconductors*, Proc. E-MRC Spring Conf. (Strasbourg, France, May 30–June 2, 2000).
- [5] O.B. Gusev, A.N. Kuznetsov, E.I. Terukov, M.S. Bresler. Appl. Phys. Lett., **70**, 240 (1997).
- [6] О.И. Коньков, А.Н. Кузнецов, П.Е. Пак, Е.И. Теруков, Л.С. Границына. Письма ЖТФ, **27** (13), 30 (2001).
- [7] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, Б.П. Захарченя, В.Х. Кудоярова, А.Н. Кузнецов, Е.И. Теруков, В. Фус, И.Н. Ясевич. ФТТ, **38** (4), 1189 (1996).
- [8] E.I. Terukov, O.I. Konkov, V.Kh. Kudoyarova, K.V. Koughia, G. Weiser, H. Kuehne, J.P. Kleider, C. Longeaud, R. Bruggermann. J. Non-Cryst. Sol., **266–269**, 614 (2000).
- [9] P.G. Le Comber, W.E. Spear. Phys. Rev. Lett., **25**, 509 (1970).
- [10] В.Х. Кудоярова, А.Н. Кузнецов, Е.И. Теруков, О.Б. Гусев, О.Б. Кудрявцев, Б.Я. Бер, Г.М. Гусинский, В. Фус, Г. Вейзер, Х. Кюне. ФТП, **32** (11), 1384 (1998).
- [11] Н. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах*, пер. с англ. (М., Мир, 1974) с. 162.
- [12] P.G. Le Comber, A. Madan, W.E. Spear. J. Non-Cryst. Sol., **20**, 239 (1972).
- [13] А.А. Андреев, О.А. Голикова, М.М. Казанин, О.И. Коньков, М.М. Мездрогина, В.А. Фейгельман. ФТП, **15** (6), 1210 (1981).
- [14] А.А. Андреев, О.И. Коньков, Н.А. Феоктистов, Т. Тургунов. Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук, **2**, 87 (1985).
- [15] R. Messier, R.C. Ross. J. Appl. Phys., **53**, 6220 (1982).
- [16] J.C. Knight, R.A. Lujan. Appl. Phys. Lett., **35**, 244 (1979).
- [17] R.C. Ross, R. Messier. J. Appl. Phys., **52**, 5329 (1981).

- [18] О.И. Коньков, Е.И. Теруков, Л.С. Границына. ФТП, **35** (10), 1250 (2001).
- [19] R.A. Gresswell, M.M. Perlmann. J. Appl. Phys., **41**, 2365 (1970).
- [20] S. Libertino, S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo. J. Appl. Phys., **78**, 3867 (1995).
- [21] В.С. Лысенко, И.П. Тягульский, И.Н. Осюк, А.Н. Назаров, Я.Н. Вовк, Ю.В. Гоменюк, Е.И. Теруков, О.И. Коньков. ФТП, **35** (6), 649 (2001).
- [22] J.S. Custer, A. Polman, H.M. van Pinxteren. J. Appl. Phys., **75**, 2809 (1994).
- [23] А. Меден, М. Шо. *Физика и применение аморфных полупроводников*, пер. с англ. (М., Мир, 1991) с. 93.

Редактор Л.В. Беляков

Conductivity and structure of erbium doped hydrogenated amorphous silicon films

O.I. Kon'kov, E.I. Terukov, L.S. Granitsina

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

Abstract The carried out research has shown that structure of a -Si:H(Er) film, used as a working layer in an electroluminescent structure, is of column-like type. Diameters of columns lie in an interval of 60–100 Å. Conductivity in such a structure varies as a function of current direction. At room temperature, in the planar geometry transport goes on by the hopping mechanism over localised levels near the conductivity zone edge being limited by the „tail“ of a zone. In the „sandwich“-geometry, conductivity is carried out on borders of columns (where conductivity is higher) by the mechanism of hopping conductivity, at the Fermi level.