

НАБЛЮДЕНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

М.Е.Компан, И.Ю.Шабанов

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
194021 Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 11 апреля 1994 г.

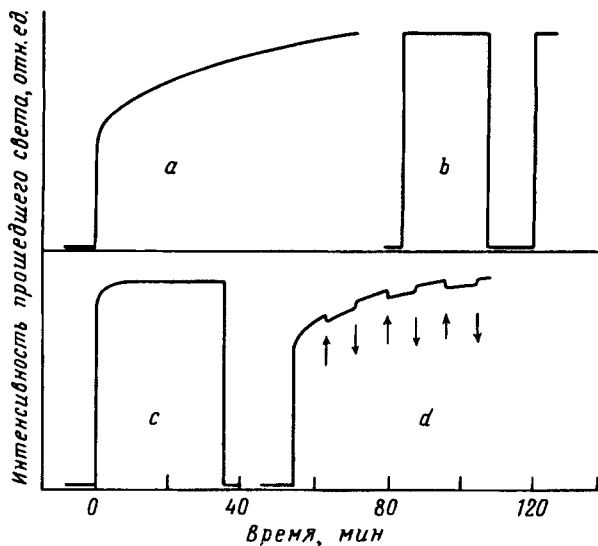
В работе наблюдался эффект запоминающегося насыщения поглощения света в тонких прозрачных слоях пористого кремния. Показано, что по своим проявлениям наблюдавшийся эффект подобен известному ранее эффекту "усталости" люминесценции и, по всей видимости, является основной причиной последнего.

Первоначальная модель пористого кремния предполагала, что его оптические свойства определяются экситонными процессами в трехмерном конгломерате квазиодномерных кремниевых "квантовых проволок" [1]. Однако по мере изучения этого необычного материала накапливалось все больше данных, требовавших для своего объяснения усложнения модели и введения дополнительных предположений. Таким был и эффект "усталости" или "фотодеградации" люминесценции – эффект, наблюдавшийся еще в первых работах по пористому кремнию [2]. В работе [3], специально посвященной исследованию этого эффекта, его происхождение связывалось с существованием особых бистабильных центров, становившихся центрами безызлучательной рекомбинации за счет энергии локализации носителей. Тем самым авторы [3] с минимальными изменениями принимали модель, использовавшуюся для объяснения "усталости" люминесценции гидрогенизированного аморфного кремния [4] и, ранее, других полупроводников [5].

Однако предлагавшаяся модель явления не объясняла тот факт, что "усталость" хорошо заметна при возбуждении люминесценции лазерами видимого диапазона (488; 633 нм) и слабо проявляется при возбуждении азотным или эксимерным лазерами (337; 308 нм). Мы предположили, что существование зависимости эффекта от энергии кванта возбуждающего света указывает на то, что эффект "усталости" люминесценции на самом деле есть проявление неизвестных (в случае пористого кремния) процессов с изменением поглощения света. По своей природе эти процессы могли бы быть подобны тем, которые приводят к известным эффектам "выжигания спектральных дыр" [6]. Ситуация при возбуждении люминесценции, когда возбуждаются состояния с одной фиксированной энергией возбуждения, а рекомбинация происходит на наборе других состояний (в других длинах волн), может способствовать появлению эффектов обеднения поглощающих состояний. Отличие между результатами экспериментов с видимым и ультрафиолетовым возбуждением люминесценции легко может быть объяснено, например, следующим образом. При возбуждении люминесценции квантом с большей энергией поглощение происходит преимущественно в состояния зонного типа (делокализованные), и память об акте возбуждения стирается при термализации. При возбуждении светом с меньшей энергией кванта возбуждение происходит в область локализованных состояний. В свою очередь, из-за того, что время жизни возбужденных носителей на локальных центрах может быть достаточно велико, это может

приводить к "выключению" из поглощения центров с определенной энергией возбуждения. Так как исследуемый материал достаточно неоднороден, отсутствие в среднем резкой границы между локализованными и делокализованными состояниями представляется вполне возможным.

Поскольку стандартные образцы пористого кремния непрозрачны и это не позволяет проводить эксперименты по поглощению, существенной частью данной работы явилось приготовление образцов. Для экспериментов по стандартной процедуре анодного травления [1] получились образцы пористого кремния на подложке. Затем под микроскопом механически отделялись чешуйки собственно пористого кремния с типичными размерами $0,2 \times 0,2 \times 0,02$ мм. Образцы-чешуйки наклеивались прозрачным лаком на черненные металлические диафрагмы с отверстием соответствующего диаметра. Использование таких образцов уменьшало риск повреждения собственно образца и позволяло надежно фиксировать свет на образце. Для регистрации пропускания использовался сфокусированный свет 30-милливаттного He-Ne-лазера. Имевшийся в нашем распоряжении аргоновый лазер из-за сильной нестабильности интенсивности использовался лишь для дополнительного возбуждения.



Эволюция интенсивности света I He-Ne-лазера (633 нм), проходящего через образец пористого кремния. По оси ординат кривые нормированы на максимальное значение: *a* — при первой засветке, *b* — при последующих засветках, *c* — переходный процесс при повторной засветке после экспозиции в ультрафиолете, *d* — частичное восстановление поглощения при дополнительном облучении светом 488 нм. Стрелками на фрагменте показаны моменты включения и выключения света 488 нм

Типичные результаты экспериментов по эволюции пропускания приведены на рисунке. После начала засветки интенсивность прошедшего образец света начинала возрастать (*a*); видимые изменения прекращались после 30–60 мин экспозиции. Выключение света на период до 1–2 дней и повторное его включение сразу приводило к уровню пропускания, соответствующему насыщенному поглощению (*b*). Заметим, что это наблюдение исключает разогрев как возможную причину наблюдавшегося эффекта.

Для более детальной характеристики обнаруженного эффекта насыщения поглощения было проверено действие дополнительных факторов на образец с насыщенным поглощением. На фрагменте *c* показан начальный участок кривой эволюции пропускания при повторной засветке для образца, который предварительно на время T порядка 15 мин был удален из луча He-Ne-лазера и помещен под сфокусированный луч азотного лазера. Из рисунка видно, что

в этом случае удается снова наблюдать переходный участок с увеличением интенсивности прошедшего света.

Наконец, мы провели двухлучевой эксперимент, аналогичный тому, что описан в [3] для люминесценции. В эксперименте регистрировалось влияние второго луча (488 нм, 30 мВт) на пропускание света зондирующего He-Ne-лазера. Как и должно следовать по нашей модели, мы увидели кривую d , симметричную кривой 5 из работы [3]: поглощение, дополнительно к красному, света с длиной волны 488 нм приводило к уменьшению насыщения поглощения (то есть к уменьшению интенсивности прошедшего через образец света $I = 633$ нм).

К сожалению, мы затрудняемся дать строгую количественную характеристику наблюдавшихся эффектов. Невозможность выполнить количественные измерения связана с наличием двух факторов: неоднородностью материала и следующей из этого невоспроизводимостью результатов от одного микрообразца к другому и, одновременно (!), невоспроизводимостью из-за наличия памяти к экспозиции на свету для каждого из образцов.

На рисунке приведен типичный вид кривых. Максимально наблюдавшееся увеличение пропускания типа a составило около двух раз; при повторном переходном процессе типа c – до 10%; влияние света 488 нм на пропускание на длине волны 633 нм – порядка 5% от интенсивности прошедшего света. Процесс развития насыщения поглощения не являлся одноэкспоненциальным.

Таким образом, во всех экспериментальных проявлениях наблюдавшийся нами эффект насыщения поглощения вел себя симметричным образом по отношению к известному эффекту "усталости" люминесценции пористого кремния. Прошедший свет возрастал при первой засветке образца, а после повторной засветки сразу соответствовал "запомненному" значению пропускания. Эффект "запоминался" на время как минимум порядка суток в темноте. "Запоминание" удавалось стереть (правда, в нашем случае мы пользовались светом ультрафиолетового диапазона, а в [2] "усталость" стиралась при нагреве образца). Одновременное действие света другой длины волны уменьшало и эффект насыщения поглощения и эффект "усталости" в [3]. По причине отсутствия более четких количественных данных мы в данной работе ограничиваемся констатацией качественно новых эффектов и, при анализе, – сравнением проявлений "усталости" люминесценции и насыщения поглощения.

Заметим, что эффект обратного действия света другой длины волны неестественен для модели, предложенной в [3], и не получил объяснения в этой работе, хотя и был обнаружен. С позиций нашей модели объяснение эффекта очевидно. Поглощение света другой длины волны происходит на центрах с другой энергией возбуждения (при этом на этой длине волны также может развиваться насыщение поглощения). Часть возбужденных вторым лучом носителей делокализуется и участвует в рекомбинации с центрами, "запомнившими" возбуждение первым лучом. При этом часть центров, выведенных первым лучом из состояния, способного к поглощению, возвращается в исходное состояние. В экспериментах это должно проявляться и как уменьшение пропускания и как увеличение интенсивности люминесценции, что, собственно, и наблюдалось. Аналогичный механизм должен обеспечивать и восстановление поглощения после облучения ультрафиолетом.

Совокупность этих наблюдений приводит к достаточно очевидному выводу: в основе эффекта "усталости" люминесценции в пористом кремнии лежит

эффект насыщения поглощения. С учетом сходства эффекта "усталости" в материале, исследуемом нами, и теми, в которых он наблюдался ранее, возможно, что существовавшие модели "усталости" люминесценции должны быть проанализированы заново и по отношению к другим материалам.

Тем не менее, мы не можем полностью свести эффекты, наблюдающиеся при "усталости" люминесценции, к насыщению поглощения. Первая из причин этого – то, что нами были выполнены чисто качественные наблюдения. Этого недостаточно, чтобы исключить возможные вклады других механизмов. Вторая причина – при исследовании "усталости" мы обнаружили особенности кинетики этого явления, не известные по работам других авторов. Эти особенности не являются следствием насыщения поглощения. Совместному анализу этих эффектов, позволяющему существенно конкретизировать картину рекомбинационных процессов в пористом кремнии, будет посвящена другая работа.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность Б.П.Захарчене за постоянное внимание к работе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (код проекта 93-02-2603).

-
1. L.T.Canham, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1046 (1990).
 2. M.S.Brandt, H.D.Fuchs, M.Stutsman et al., *Sol. St. Comm.* **81**, 307 (1992).
 3. I.M.Chang, S.C.Pan, and Y.F.Chen, *Phys. Rev.* **B48**, (12), 8747 (1993).
 4. I.F.Chen, S.F.Huang, and W.S.Chen, *Phys. Rev.* **B44**, (23), 12748 (1991).
 5. F.Mollet, J.Cernogora, and C.B. a La Guillaume, *Philos. Mag.* **B42**, (5) 643 (1980).
 6. G.J.Small, in: *Modern Problems in Condensed Matter Science*, **4**, ed by U.M.Agranovich and R.M.Hochstrasser, North-Holland, 1983.