

# Ориентационно-зависимый эффект Фарадея в тонких пленках пористого кремния

© М.Е. Компан, И.Ю. Шабанов, Я. Салонен\*

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

\*Turku University,  
Turku, Finland

E-mail: kompan@solid.pti.spb.su

(Поступила в Редакцию 14 июля 1998 г.)

Как было показано в недавнем аналитическом обзоре, поток работ по пористому кремнию сравним с потоком публикаций по столь фундаментальной проблеме, как высокотемпературная сверхпроводимость [1]. Не в последнюю очередь это обусловлено "неисчерпаемостью" этого материала, необычные свойства которого представляют интерес для самых различных дисциплин физики, химии и техники.

Данная работа обращается к еще одной группе свойств этого материала, до настоящего времени практически не затронутой исследователями, — к магнитным свойствам пористого кремния (*PSi*). Существует лишь несколько работ, посвященных магнитным свойствам этого материала. Как это бывает в случае пористого кремния, авторы различных работ приходят к противоположным выводам. Возможная причина расхождений понятна: под общим названием "пористый кремний" подразумевается целый класс материалов, различающихся между собой не только составом, не только характеристиками квантоворазмерных элементов — "проволок", но структурой и топологией построения материала на мезоскопическом уровне. Однако наличие расхождений не может служить основанием для отказа от исследований.

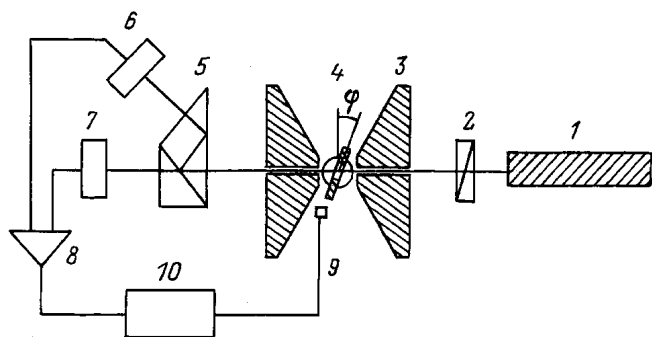
Существуют две работы, по результатам которых можно предположить наличие особых магнитных свойств у *PSi* и его близкого аналога, получаемого в электрическом разряде. В первой из них с помощью SQUID магнитометра были зарегистрированы магнитный момент и гистерезис намагниченности *PSi* во внешнем магнитном поле [2]. Во второй работе зависимость от магнитного поля с характерным гистерезисом проявлялась в интенсивности люминесценции для модификации кремния, обработанного искровым разрядом [3]. Различие образцов и фрагментарность опубликованного материала в [3] не позволяют анализировать результаты [2,3] и сравнивать их с результатами наших опытов. Однако наличие этих работ инициировало данное исследование и вместе с ним является достаточным доказательством нетривиальных магнитных свойств пористого кремния. (Заметим, что в то же время в значительном числе работ, в том числе в специально посвященных этому вопросу, например [4], не было обнаружено особенностей магнитных свойств *PSi*).

Выбор в данной работе эффекта Фарадея для характеристики магнитных свойств *PSi* обусловлен тем, что этот эффект более непосредственно связан с намагниченностью, чем интенсивность люминесценции, и в то же время в отличие от SQUID исключает регистрацию магнитных моментов посторонних частиц и адсорбатов.

## 1. Техника эксперимента и исследовавшиеся образцы

Образцы для исследования представляли собой свободные пленки пористого кремния с поперечными размерами менее сантиметра, закрепленные в жесткой пластмассовой оправе. Образцы получались травлением пластин кремния *n*-типа с ориентацией [100] и удельным сопротивлением 0.015–0.025  $\Omega/\text{cm}$  в смеси 38% плавиковой кислоты с абсолютным этанолом в соотношении 1/1, при анодном смещении образца относительно травящего раствора и одновременном освещении травящихся образцов светом галогенной лампы. Плотность тока травления составляла 75  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . После 6–10 минут травления плотность тока повышалась на порядок, что приводило к отделению свободной пленки пористого кремния от материнского кристалла. Толщина образцов составляла порядка 0.05  $\text{mm}$ , что обеспечивало на длине волны 6328  $\text{\AA}$  оптическое пропускание около 1/3, близкое к оптимальному для экспериментов по фарадеевскому вращению. Эта же величина — 0.05  $\text{mm}$  использовалась для оценки величины удельного вращения плоскости поляризации в исследовавшихся образцах *PSi*.

Блок-схема установки для исследования магнитного вращения плоскости поляризации приведена на рис. 1. Источником света являлся 2  $\text{mW}$  He–Ne-лазер (1) с дополнительным поляризатором излучения (2). Магнитное поле с индукцией до 3.8  $\text{kG}$  создавалось лабораторным электромагнитом (3), конструкция которого позволяла пропускать свет в зазоре вдоль силовых линий. Регистрация сигнала угла поворота плоскости поляризации осуществлялась по дифференциальной схеме, исключающей появление ложных сигналов из-за изменения интенсивности лазера. Световой пучок после прохождения образца (4) проходил специальную поляризационную призму (5), на выходе которой пу-



**Рис. 1.** Блок-схема установки по измерению фарадеевского вращения. 1 — He-Ne-лазер, 2 — поляризатор, 3 — электромагнит, 4 — образец, 5 — поляризационная призма — расщепитель пучка, 6, 7 — фотоприемники, 8 — дифференциальный усилитель, 9 — датчик магнитного поля, 10 — блок регистрации.

чок расщеплялся на два, поляризованные ортогонально друг к другу и под углом  $45^\circ$  к исходному пучку. Поворот плоскости поляризации в образце приводил к возрастанию интенсивности одного пучка и к уменьшению интенсивности второго. Пропорциональный углу поворота разностный электрический сигнал снимался с диагонали моста, куда были включены два фотоприемника (6, 7), регистрирующие интенсивности каждого из пучков на выходе призмы-расщепителя. Чувствительность регистрации к углу поворота для прозрачных образцов составила  $10^{-4}$  rad.

Образцы могли поворачиваться в зазоре между полюсами. Ось поворота совпадала с направлением поляризации проходящего света, что минимизировало возможную деполаризацию при поворотах образца. Эксперименты проводились при комнатной температуре.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты показали наличие значительного эффекта Фарадея в исследованных образцах пористого кремния. Сигнал поворота плоскости поляризации при нормальном падении света на пленку в диапазоне использованных полей соответствовал постоянной Верде  $0.15 \text{ arc min/G cm}$ . Сравнимую по величине постоянную Верде имеет, например, насыщенный раствор хлорного железа ( $0.2 \text{ arc min/G cm}$  [6]). Угол поворота линейно зависел от величины приложенного магнитного поля.

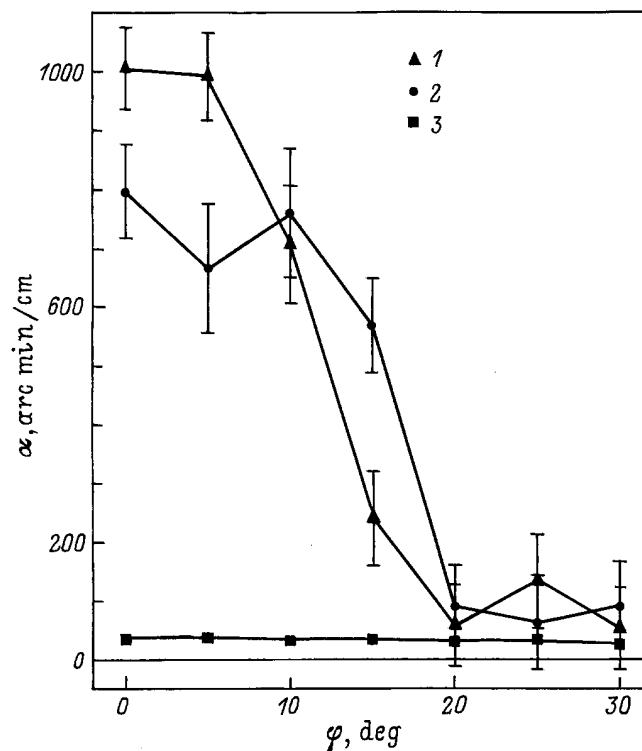
Необычной оказалась зависимость фарадеевского вращения от угла разворота образца (отклонения нормали к поверхности от направления силовых линий магнитного поля). Как показано из рис. 2, в случае пористого кремния сигнал убывает до уровня шумов установки при углах разворота образца порядка  $30^\circ$ . В то же время та же зависимость для стандартного диамагнитного материала носит совершенно другой характер: сигнал вращения

от кварцевой пластинки даже несколько возрастал при ее развороте в поле. Таким образом, два факта — значительная величина эффекта и аномальная угловая зависимость являются необычными и требуют объяснения.

## 3. Обсуждение результатов

Поскольку опыты с самого начала ставились для получения независимых данных о необычных магнитных свойствах пористого кремния и с учетом работ [2,3], естественно попытаться интерпретировать полученные результаты в терминах магнитооптики ферромагнитного материала.

При такой трактовке все основные факты данной работы легко интерпретируются. Линейная зависимость угла поворота от величины приложенного поля является следствием эффекта формы: тонкая магнитная пленка (в предположении анизотропии материала) при действии поля в направлении нормали к поверхности пленки должна иметь эффективную магнитную проницаемость, равную единице. Это означает, что характеристики намагничивания по нормали для такой пленки будут такими же, как у немагнитного материала, что и наблюдалось. Достаточно большая величина фарадеевского вращения, по-видимому, обусловлена концентрацией магнитных центров.



**Рис. 2.** Зависимости угла поворота ( $\alpha$ ) плоскости поляризации в магнитном поле  $3.5 \text{ kG}$  от угла разворота образца относительно направления силовых линий ( $\varphi$ ) для свободных пленок пористого кремния (1 — пленка PSi № 1, 2 — пленка PSi № 2) и пластинки плавяного кварца (кривая 3).

Аномальная поляризационная зависимость может быть следствием суперпозиции диамагнитного и ферромагнитного (или парамагнитного) механизмов. Можно показать, что если фарадеевское вращение материала обусловлено суммой диамагнитного и магнитного вкладов и если эти вклады имеют постоянные Верде разного знака, то при некотором угле разворота образца в поле диамагнитный и магнитный вклады должны компенсировать друг друга. Это легко понять на качественном уровне. Как было объяснено выше, при нормальном падении света даже большая магнитная проницаемость не проявляется, а при развороте пленки поле в плоскости пленки начнет расти, так как в плоскости пленки велика магнитная проницаемость. Однако при малых углах разворота это не проявляется в эффекте Фарадея, так как из-за эффекта преломления свет будет распространяться в пленке почти нормально к поверхности и почти не будет иметь составляющей вдоль поля. Однако при некотором угле разворота образца величины парамагнитного и диамагнитного вкладов должны сравняться по величине. Для диамагнитного материала, у которого изотропная и близкая к единице магнитная проницаемость, такой эффект должен отсутствовать — что и наблюдается в эксперименте (рис. 2).

Предположение о разных знаках константы Верде для диа- и парамагнитного (ферромагнитного) вкладов, использовавшееся в объяснении, соответствует типичной ситуации — см., например, [5,6].

Подчеркнем, что на основании наших экспериментов мы не можем сделать вывод о наблюдении ферромагнетизма в *PSi*. Наши данные свидетельствуют лишь о значительном эффекте Фарадея с константой Верде порядка  $0.15 \text{ arc min/G cm}$  и о значительной магнитной проницаемости материала в направлении плоскости пленки.

Таким образом, наблюдался магнитооптический эффект Фарадея в пленках пористого кремния. Ряд характеристик наблюдавшегося эффекта легко объясняется в предположении о ферромагнитном поведении этого материала. В совокупности с результатами работ [2,3] это может представляться достаточно вероятным. Однако нельзя упускать из виду и многие работы, в которых не наблюдалось проявлений магнетизма пористого кремния. Возможны более сложные модели для интерпретации экспериментальных данных, не требующие предположения о ферромагнитном упорядочении. Однако из имеющихся результатов ясно следует нетривиальность магнитных свойств пористого кремния и необходимость их дальнейшего изучения.

## Список литературы

- [1] Vera Parkhutić. Int. Conf. on Porous Semiconductors (PSST-98). Extended Abstracts. Majorca (1998). Abstract P2-23. P. 232.
- [2] R. Laiho, E. Lahderanta, L. Vlasenko, M. Afanasiev. J. Lumin. **57**, 197 (1993).

- [3] R.E. Hummell, M.E. Stora, N. Shepherd, S. Yu. Int. Conf. on Porous Semiconductors (PSST-98). Extended Abstracts. Majorca (1998). Abstract O-42. P. 76.
- [4] C.Y. Perry, F. Lu, F. Namavar, N. Kalhoran, R. Soret. Appl. Phys. Lett. **60**, 3117 (1992).
- [5] Д.И. Сивухин. Оптика. Наука, М. (1985). 751 с.
- [6] Д. Кей, Е. Лэби. Справочник физика-экспериментатора. Ин. лит., М. (1949). 299 с. (G.W.C. Kaye, T.H. Laby. Tables of Physical and Chemical Constants. London (1941)).