

| Кристалл | Примесь | E_{rel}/λ , мэВ | S | Литература |
|------------------|---------|-------------------------|-------|------------|
| ZnS | Fe | 63 | 6.7 | [5] |
| ZnS | Cr | 93 | | [8] |
| ZnSe | Cr | 83 | | [8] |
| ZnTe | Cr | 40 | | [8] |
| CdTe | Cr | 40 | | [8] |
| CdF ₂ | In | 250 | 50—80 | [7, 9] |
| AlGaAs | Se | 188 | | [10] |
| AlGaAs | Te | 188 | | [10] |
| AlGaAs | Si | 298 | | [10] |
| AlGaAs | Sn | 250 | | [10] |
| GaAsP | S | 333 | | [10] |
| GaAsP | Te | 145 | | [10] |

Реакция лигандов на такое делокализованное изменение заряда (т. е. релаксация решетки) оказывается подавленной по сравнению с ситуацией, когда изменение заряда в процессе фотоионизации происходит в ядре примесного центра.

Таким образом, относительно слабая релаксация решетки при фотоионизации $3d$ -примесей является еще одним (насколько нам известно, ранее не упоминавшимся) подтверждением механизма саморегуляции, определяющего специфику этих глубоких примесей в полупроводниках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] R. Kubo, Y. Toyozava. *Progr. Theor. Phys.*, **13**, 160 (1955).
- [2] B. Monemar, L. Samuelsen. *Phys. Rev. B*, **18**, 809 (1978).
- [3] G. Lukovsky. *Sol. St. Commun.*, **3**, 299 (1965).
- [4] U. Piekara, J. M. Langer, B. Krukowska-Fulde. *Sol. St. Commun.*, **23**, 583 (1977).
- [5] А. В. Васильев, Г. М. Зингер, Ю. Б. Розенфельд, А. И. Рыскин. *ФТП*, **27**, 1305 (1992).
- [6] R. D. M. Haldane, P. W. Andersen. *Phys. Rev. B*, **13**, 2553 (1976).
- [7] V. N. Flerov, K. A. Kikoin. *J. Phys. C: Sol. St. Phys.*, **9**, 1673 (1976).
- [8] J. M. Baranowsky. In: *Deep Centers in Semiconductors* (ed. by T. Pantelides), 691. N. Y. (1985).
- [9] J. E. Dmochowsky, J. M. Langer, Z. Kalinski, W. Jantsch. *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 1735 (1986).
- [10] D. Lang. In: *Deep Centers in Semiconductors* (ed. by T. Pantelides), 489. N. Y. (1985).

Редактор Т. А. Полянская

ФТП, том 27, вып. 8, 1993

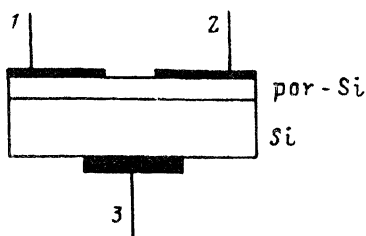
СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ШОТТКИ НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

Л. В. Беляков, Д. Н. Горячев, О. М. Сресели, И. Д. Ярощецкий

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

(Получено 22 декабря 1992 г. Принято к печати 24 декабря 1992 г.)

Введение. Пористый кремний (por-Si) привлекает внимание исследователей благодаря его интенсивному и широкому спектру фотолюминесценции в видимой области спектра [1]. Существенно меньшее внимание уделяется его фотоэлектрическим свойствам. В данной работе исследованы фотоэлектрические свойства пористого кремния в контакте с некоторыми металлами и рассмотрена корреляция их со спектрами фотолюминесценции.



Эксперимент

Слои пористого кремния изготавливались по известной методике (см., например, [2]) путем анодного окисления p -Si (4.5 Ом·см) в электролитической ячейке с платиновым контрольным электродом и водно-спиртовым раствором HF в качестве электролита. Анодная плотность тока поддерживалась постоянной во времени и составляла обычно от 5 до 20 мА/см². Длительность электролиза 10—60 мин. Однородность слоя por -Si по площади образца обеспечивалась соответствующей формой и расположением контрэлектрода, а также интенсивным перемешиванием электролита. Толщины слоев колебались от 10 до 60 нм. Полученные слои обладали фотолюминесценцией (ФЛ) в видимой области спектра. На поверхность por -Si напылялся полупрозрачный слой металла (Au или Ni) в виде двух полосок. Омический контакт к подложке создавался нанесением индия на ее нижнюю шероховатую поверхность. Исследуемая структура Me/por -Si/ p -Si/ Me изображена на рис. 1.

Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) между контактами 1 и 3 или 1 и 2, спектральные характеристики фототока при подаче внешнего постоянного смещения между этими же парами контактов и без него, а также зависимости фототока от смещения на разных длинах волн и при разной интенсивности света.

Дополнительно были измерены спектральные зависимости пропускания свободных пленок por -Si толщиной от 30 до 150 мкм.

Результаты

Структуры Me/por -Si/ p -Si/ Me (контакты 1—3 или 2—3) обладают выпрямляющими свойствами. Вольт-амперные характеристики структур типичны для неидеальных диодов с большим последовательным сопротивлением базы R_s . Обычно R_s составляет 3—5 кОм, коэффициент неидеальности 3—4, высота барьера для Au равна 0.7—0.8 эВ, для Ni — 0.9 эВ. Эти параметры характерны для нетермоэлектронного механизма протекания тока в структуре.

ВАХ, измеренные между идентичными контактами 1 и 2 (металл— por -Si—металл), типичны для двух встречно включенных диодов. Это обстоятельство, а также ряд других факторов позволяют предполагать, что энергетический барьер локализован в основном на границе металл— por -Si, а полученные образцы являются структурами Шоттки.

Спектральные характеристики фототока структур (рис. 2, кривые 1, 2) отличаются от аналогичной зависимости, полученной для структуры кремний—металл, наличием «крыльев» в коротковолновой части видимого спектра и вблизи края фундаментального поглощения Si. Величина фототока структур с пористым кремнием значительно превышает фототок, измеренный в таких же условиях на структурах Si—металл. Надо отметить, что такими характеристиками обладают только структуры с интенсивной ФЛ.

При приложении запирающего смещения к структуре (минус к подложке) наблюдается неравномерный по спектру рост фототока с увеличением напряжения, причем в спектральной области чувствительности кристаллического кремния фототок растет быстрее, чем в области крыльев. В результате этого при больших смещениях и насыщении фототока спектральная характеристика структур (рис. 2, кривая 3) принимает вид, близкий к виду спектральной характеристики

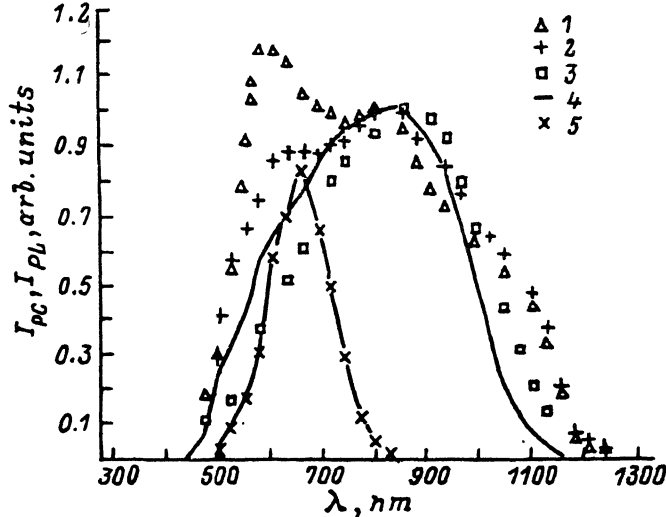


Рис. 2. Спектральные зависимости фототока I_{ph} структур $Me/por-Si/p-Si/Me$ (1—3) и стандартного кремниевого фотодиода (4). Напряжение смещения, В: 1—0.2; 2—0.5, 3—2.5, 4—2.5 (Масштаб: 1— $\times 15$, 2— $\times 3$, 3— $\times 1.4$; 4— $\times 1.5$ —фотолюминесценция I_{PL} пористого кремния).

кремниевого фотодиода (кривая 4). Точковая чувствительность структур при этом не хуже чувствительности стандартных кремниевых фотодиодов.

Коэффициент поглощения α свободных пленок толщиной до 50 мкм (рис. 3) в диапазоне длин волн 500—900 нм существенно больше значений, приводимых в работе [3], эта же зависимость, перестроенная в координатах $(\alpha h\nu)^{1/2} = f(h\nu)$, формально дает значения непрямых переходов с энергией порядка 1.45—1.65 эВ.

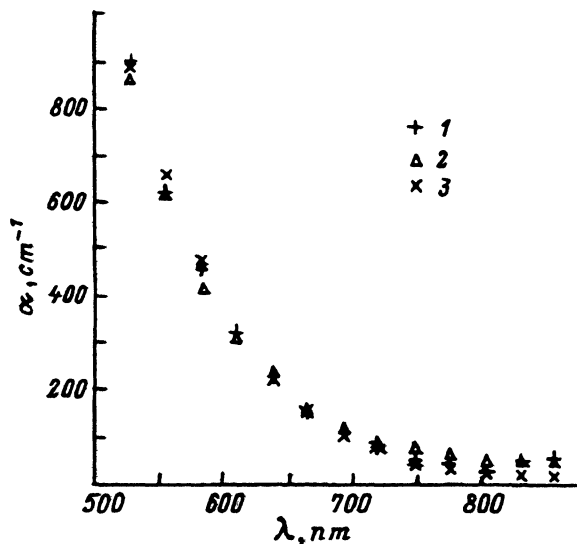
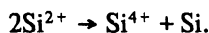


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента поглощения α тонких пленок пористого кремния. Толщины пленок, μm : 1—30, 2—35, 3—50.

Пористый кремний представляет собой, судя по известным из литературы данным, конгломерат из нитей или столбиков кремния, пор в виде каналов и полостей [2], а также микрокристаллов объемного кремния [4], оставшихся при прорастании пор либо сформировавшихся в результате реакций диспропорционирования ионов Si^{2+} , первоначально образующихся при анодировании [5]:



Поэтому естественно подобие спектральных характеристик фототока por-Si и подложек, на которых он выращен. Интерес представляют отличия этих кривых, по которым можно судить об особенностях пористого кремния. Общее возрастание фотоответа можно качественно объяснить увеличением поглощения света сильно развитой поверхностью por-Si , а также уменьшением скорости поверхностной рекомбинации [3]. Появление крыльев спектральной кривой фототока связано, очевидно, с новыми энергетическими состояниями, присущими пористому кремнию. В видимой области это подтверждается и корреляцией между фототоком и ФЛ (рис. 2, кривая 5), т. е. уровни, ответственные за излучательные переходы, проявляются и в спектре фототока пористых структур. Увеличение фотоответа в длинноволновой области спектра не нашло пока удовлетворительного объяснения.

Можно высказать ряд предположений о причинах разного влияния запорного смещения на фотоответ в спектральных областях чувствительности собственно кремния и por-Si . Прежде всего с удалением от поверхности por-Si содержание кристаллического кремния в слое может увеличиваться. Это предположение подтверждается наблюдавшимся при микрозондировании скола por-Si ослаблением ФЛ по мере продвижения светового зонда от поверхности к границе с кристаллическим кремнием [6]. Распирение области пространственного заряда (ОПЗ) с увеличением напряжения смещения увеличивает вклад в фототок обогащенной кремнием части слоя. Если ОПЗ захватывает почти весь слой, то может также давать вклад поглощение света в подложке и собиране генерируемых в ней носителей, так как судя по измеренным значениям коэффициента поглощения, свет может частично проникать в кремний. Наблюдаемые спектральные характеристики позволяют рассматривать исследованную структуру как гетеропереход пористый кремний—кремний с барьером Шоттки на широкозонной стороне. Свойства собственно гетерограницы требуют дальнейшего исследования.

Заключение. Получены слои пористого кремния, измерены спектры их пропускания, изготовлены структуры Шоттки на пористом кремнии, измерены спектральные характеристики фототока структур при различных смещениях.

Полученные структуры с повышенной чувствительностью и расширенной рабочей спектральной областью могут в дальнейшем найти применение в оптоэлектронике.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. В. Андрианову и Д. И. Ковалеву за измерение спектров фотолюминесценции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Abstracts of AA Symp. of MKS Fall meeting. Boston (1991). Int. Workshop Conf. on light emission from silicon (LESI). Munchen (1992).
- [2] L. T. Canham. Appl. Phys. Lett., 57, 1048 (1990).
- [3] J. P. Zheng, K. L. Jiao, W. P. Shen, W. A. Anderson, H. S. Kwok. Appl. Phys. Lett., 61, 459 (1992).
- [4] M. W. Cole, J. F. Harvey, R. A. Lux, D. W. Eckart, R. Tsu. Appl. Phys. Lett., 60, 2800 (1992).

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ (111) КРЕМНИЕВЫХ ШАЙБ *p*-ТИПА В АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

Л. Н. Болотов, В. А. Козлов, И. В. Макаренко, А. Н. Титков

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

(Получено 22 декабря 1992 г. Принято к печати 24 декабря 1992 г.)

Характерная для современной микроэлектроники тенденция к уменьшению размеров ее базовых элементов до субмикронных, а также стремление к улучшению характеристик мощных полупроводниковых приборов, получаемых прямым сращиванием кремниевых пластин, вызывает растущий интерес к информации о рельефе и локальных электронных свойствах поверхности кремниевых шайб с нанометровым разрешением. Весьма удобная возможность наблюдения топографической структуры поверхности реализуется при использовании сканирующих туннельных микроскопов (СТМ), которые по своим техническим возможностям позволяют достаточно легко воспроизводить рельеф поверхности с желаемой точностью.

До сих пор топографические исследования поверхности кремния с использованием СТМ проводились в основном в сверхвысоком вакууме или атмосфере инертного газа [¹⁻³]. В то же время весьма важным является применение подобного метода при атмосферных условиях, привлекающего большей доступностью и простотой. В атмосферных условиях поверхности кристаллов обычно окислены, но эту сложность научились обходить, травливая слой окисла и защищая открывшуюся поверхность тонкими пассивирующими покрытиями. Недавно, однако, было обнаружено еще одно препятствие на пути записи рельефа кремниевых поверхностей в атмосферных условиях. В работах [^{4, 5}] для кристаллов *n*-типа было замечено, что при последовательных сканированиях одного и того же участка поверхности изображение рельефа видоизменялось. Основная модификация рельефов состояла в том, что на получаемом в СТМ изображении поверхности первоначально экспонированные участки «проседали» на глубину от одного до нескольких нанометров относительно уровня неэкспонированной поверхности. В работе [⁶] сообщалось о накоплении эффекта при увеличении времени экспозиции. Следует отметить, что СТМ изображение поверхности отражает в совокупности как ее истинный геометрический рельеф, так и изменение ее электронных свойств в разных точках. Авторы работ [^{4, 5}] пришли к заключению об электронной природе наблюдаемого эффекта, обусловленной внедрением атмосферного кислорода в поверхность под воздействием сильного электрического поля в туннельном зазоре. Таким образом, при изучении реального нанорельефа поверхности с помощью СТМ существует опасность получения искаженной картины из-за изменения электронных свойств поверхности.

Настоящая работа направлена на выяснение наличия электронных искажений изображения поверхности *p*-типа кремния в атмосферных условиях, а также на проверку возможности записи реального рельефа поверхности в этих условиях.