

О МЕХАНИЗМЕ ТОКОПЕРЕНОСА И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ СТРУКТУР Pd-SiN-p-Si

© С.В.Слободчиков, Е.В.Руссу, Х.М.Салихов,
М.М.Мередов, А.И.Язлыева

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
(Получена 25 августа 1995 г. Принята к печати 31 августа 1995 г.)

Исследованы вольт-амперные характеристики и фототок в диодных структурах Pd-SiN-p-Si. Процесс токопереноса определяется двойной инжекцией носителей при прямых смещениях в дрейфовом приближении и при обратных — в диффузном приближении. Обнаружено усиление фототока и темнового тока при обратном смещении на 2 порядка величины. Выявлен участок отрицательного дифференциального сопротивления с *N*-образной вольт-амперной характеристикой. Дано качественное объяснение этим явлениям с учетом решающего влияния центров захвата дырок и электронов с глубокими уровнями.

В последние два десятилетия вопросам разработки технологии диэлектрических слоев Si₃N₄ и исследованию их физико-химических свойств уделяется значительное внимание. Это, как известно, связано с необходимостью улучшения и стабилизации электрических характеристик, эксплуатационной надежности ряда полупроводниковых приборов в основном на кремнии.

Слои Si₃N₄ используются в качестве диффузионных масок и для пассивации поверхности планарных полупроводниковых приборов. Исследование механизма токопереноса в слое играет значительную роль в определении оптимальной технологии и оценке возможных причин деградации параметров создаваемых диодных структур. Механизм токопрохождения и диэлектрические свойства слоев Si₃N₄ изучались в ряде работ, обзор которых содержится в [1]. В некоторых из них, в частности в [2], показано, что ток определяется свойствами объема, а не контактными явлениями и связан с присутствием центров захвата носителей. В этой связи можно ожидать, что наличие и химических примесей, и дефектных состояний, создающих как мелкие, так и глубокие уровни, может кардинально изменить механизм токопрохождения в слое нитрида кремния. Роль возможных примесных и дефектных состояний в нитриде кремния как центров захвата и их природа теоретически рассмотрены в [3].

В настоящей работе представлены результаты исследования диодных структур Pd-SiN-p-Si, показывающие резкое изменение механизма токопереноса и фотоэлектрических свойств вследствие решающей роли центров захвата электронов и дырок в слое SiN.

1. Технология

Слой нитрида кремния осаждался из газовой фазы, причем процесс стимулировался высокочастотной плазмой (частота $f = 1356$ МГц) в смеси $\text{SiH}_4 + \text{N}_2$. Подложками для выращивания слоев служили пластины p-Si с ориентацией (100) и удельным сопротивлением $\rho \approx 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Высокочастотная плазма возбуждалась в реакционной камере, предварительно откачанной до давления 10^{-4} Па. После этого в нее запускалась газовая смесь SiH_4 и N_2 потоками $2 \div 40$ и $30 \div 600 \text{ см}^3/\text{мин}$ соответственно. Скорость осаждения зависела от соотношения $[\text{SiH}_4]/[\text{SiH}_4 + \text{N}_2]$ и составляла $50 \text{ \AA}/\text{мин}$ для потока азота $420 \text{ см}^3/\text{мин}$. Температура подложки составляла 350°C . Толщина выращенных слоев была $\sim 0.3 \text{ мкм}$. Палладий осаждался в вакууме методом термического испарения с последующим отжигом при 150°C . Были проведены измерения вольт-амперных характеристик, фототока и его изменения в зависимости от приложенного смещения.

2. Результаты измерений и их обсуждение

Вид вольт-амперных характеристик (рис. 1), снятых при прямом (знак « \leftarrow » на Pd) и обратном смещениях, свидетельствует прежде всего о большом вкладе в механизм токопереноса как контактных явлений, так и объема слоя SiN. Это отличается от данных работы [2], где показано, что решающим фактором являются свойства объема слоя Si_3N_4 . Аналитически прямая ветвь может быть описана как $I = AV^2$, в то время как в интервале обратных напряжений $V = 0 \div 6 \text{ В}$ ток

$$I = B \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right), \quad (1)$$

где $n = 45$.

Полученные зависимости для прямых смещений, на наш взгляд, можно объяснить двойной инжекцией электронов и дырок в дрейфовом приближении, а для обратных — двойной инжекцией в диффузионном приближении [4]. В обоих случаях необходимо, чтобы толщина слоя нитрида кремния W превосходила амбиполярную длину диффузионного смещения $L_{n,p}$. В (1) $n = \text{ch}(W/L_{n,p})$, и тогда в нашем случае $L_{n,p} = 570 \text{ \AA}$. Как правило, все предлагаемые модели проводимости в слое отводят решающую роль глубоким уровням захвата, однако до сих пор нет полной ясности относительно природы и количественных характеристик этих уровней.

Результаты наших измерений вольт-амперных характеристик, так же как и фототока I_{ph} в зависимости от обратного смещения (рис. 2), тоже свидетельствуют об определяющей роли уровней захвата носителей тока. Как показывают литературные данные, уместно связать

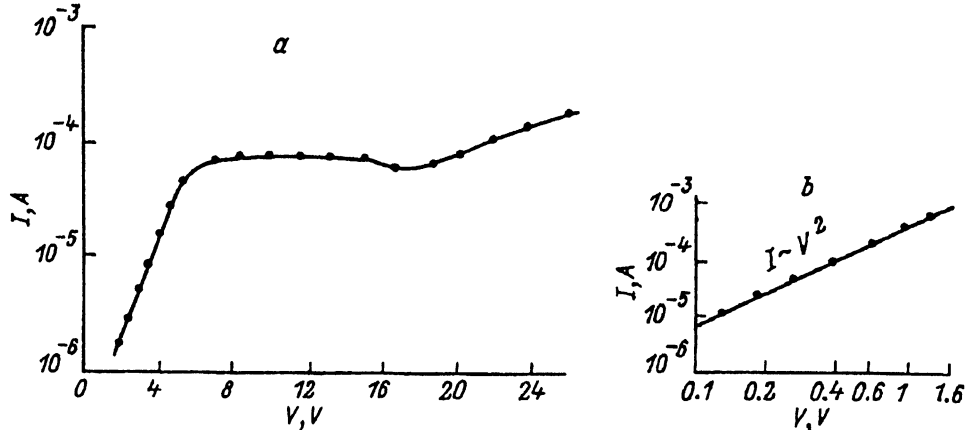


Рис. 1. Вольт-амперная характеристики диодных структур Pd-Si-p-Si: *a* — обратная ветвь (знак «+» на Pd), *b* — прямая ветвь.

особенности технологии получения слоев нитрида кремния с природой некоторых возможных центров захвата. В первую очередь, оказываются важными стехиометрия слоев, наличие примесей кислорода и водорода и их комплексов с компонентами слоев SiN. Как следует из данных [5], слои SiN, получаемые плазменным осаждением, довольно сильно обогащены Si: соотношение компонент составляет $[Si]/[N] = 1.37$. Кроме того, в таких слоях имеется значительная концентрация Si-H-связей, а также в меньших количествах Si-N-связей. В [3] выполнен расчет электронных уровней, обусловленных как оборванными связями Si и N, так и связями Si-Si, Si-H, Si-N. Из этих данных следует, что σ -состояния Si-Si находятся вблизи центра запрещенной зоны (около 3 эВ). При такой глубине они предполагаются полностью заполненными, и можно считать их активными центрами захвата дырок. Наполовину заполненные оборванные связи Si создают уровни около края зоны проводимости и могут считаться центрами захвата электронов. σ -состояния Si-H находятся на 0.5 эВ выше верха валентной зоны и имеют «хвост» в запрещенной зоне. Высокая концентрация дефектов

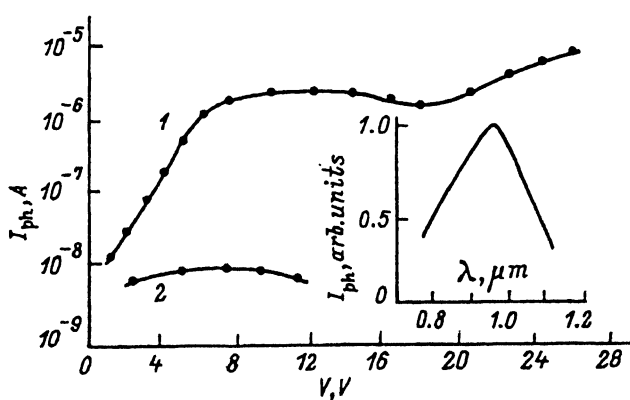


Рис. 2. Зависимость фототока от смещения диодных структур Pd-SiN-p-Si при обратном («+» на Pd) (1) и прямом (2) смещении. На вставке — спектральная характеристика фототока диодных структур Pd-SiN-p-Si.

и примесей в наших слоях нитрида кремния приводят к резкому росту темнового тока и деградации диэлектрических характеристик. При этом механизмы токопереноса становятся подобны соответствующим механизмам в широкозонных полупроводниках.

Для оценки вклада электронной и дырочной компонент темнового тока или фототока важным является установить природу последнего. Спектральное распределение фотоэдс (рис. 2, вставка) показывает, что фотоответ определяется генерацией фотоносителей в кремнии, и возникновение фотоэдс связано с разделением электронно-дырочных пар на барьере нитрид кремния-кремний. Это подтверждается также дополнительными исследованиями влияния водорода на контакт палладий-нитрид кремния, которые не выявили никакого изменения фотоэдс. Сильное изменение фотоответа в структурах на основе Si с тонким слоем диэлектрика и палладиевым контактом наблюдалось нами ранее вследствие увеличения или уменьшения высоты барьера [6]. Фототок в изученных структурах, таким образом, определяется основным вкладом электронной компоненты

$$I_n \sim (q\Phi_0\alpha L_n)T(\lambda) \exp(-\alpha W_1), \quad (2)$$

где Φ_0 — интенсивность падающего потока излучения, α — коэффициент поглощения, L_n — диффузионная длина электронов, $T(\lambda)$ — коэффициент оптического пропускания системы Pd + SiN, W_1 — ширина слоя истощения. В конечном итоге фотоответ оказывается зависящим через L_n от времени жизни электронов и их подвижности. Фототок без смещения обусловлен влиянием монополярной инжекции электронов в слой SiN, в котором, вероятно, идет захват на уровне Si с разорванными связями, ограничивающий время жизни τ_n . При приложенном смещении необходимо рассматривать механизм двойной инжекции электронов и дырок в слой SiN, причем коэффициенты инжекции электронов $\beta_n = I_n/(I_n + I_p)$ и дырок $\beta_p = I_p/(I_n + I_p)$ на гетерограницах Pd-SiN и SiN-p-Si имеют существенное значение для механизмы токопереноса. На кривой зависимости фототока от обратного смещения (рис. 2, кривая 1) выявляются две области усиления фототока: первая в интервале $0 \div 14$ В, где фототок I_{ph} возрастает на 2 порядка, и вторая при $V > 19$ В. Между ними как в темновом токе, так и в фототоке наблюдается область отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) N -образного вида. Рассматривая возможные механизмы усиления, следует отметить, что объяснить этот эффект вкладом только одного глубокого рекомбинационного уровня с учетом модуляции времени жизни в слое трудно. Такой механизм обычно приводит к ОДС с вольт-амперной характеристикой S -образного вида. В этой связи нам представляется целесообразным учесть несколько уровней захвата электронов и дырок. В соответствии с предполагаемой природой центров захвата, отмеченной выше, механизм изменения темнового тока и фототока во всем изученном интервале обратных смещений можно представить следующим образом. Для инжектированных в слой SiN дырок имеются два рекомбинационных барьера: один связан с центрами захвата около середины запрещенной зоны, с концентрацией N_{11} , второй — в ее нижней половине, с концентрацией N_{12} ; для электронов существует один барьер у верха зоны, с концентрацией N_{13} . Можно предположить, что при малых смещениях $L_p < L_n$. С ростом смещения идет заполнение центров захвата дырок и электронов, при этом

вследствие неравенства $\beta_p < \beta_n$ рост L_p меньше роста L_n и, следовательно $L_p \ll L_n$. При заполнении электронами центров N_{13} происходит максимальное увеличение L_n , ограничиваемое лишь возрастающей рекомбинацией через центры N_{t1} с захваченными дырками. В этом случае, пока не достигнуто насыщение центров N_{t1} , темновой ток (или фототок) будут расти согласно (1), и из-за увеличения проводимости слоя SiN вследствие роста L_n и L_p происходит перераспределение напряжения в сторону увеличения его на инжектирующих контактах, т.е. возрастают β_n и β_p [7]. Фототок возрастает почти на 2 порядка величины. При дальнейшем росте смещения процесс должен был бы привести к образованию ОДС и S-образной вольт-амперной характеристики. В нашем случае наблюдается N-образная характеристика, т.е. ОДС контролируется не током, а напряжением. Это можно связать с зависимостью времени жизни $\tau_{n,p}$ от электрического поля E . В приконтактной области, например, у гетерограницы Si-SiN, в процессе инжекции образуется домен сильного поля, в котором при росте смещения достигается критическая величина E_{cr} . Происходит «пробой» потенциального барьера соответствующих центров захвата, темп рекомбинации возрастает, что снижает $\tau_{n,p}$, а с ним и стационарную концентрацию неравновесных носителей. При дальнейшем росте смещения домен расширяется, среднее поле в нем становится меньше E_{cr} и ток снова растет. N-образные характеристики (с возникновением домена) наблюдались нами при исследовании высокоомных кристаллов InP:Fe и InP:Cr [8]. При прямых смещениях, где, как можно предположить, $\beta_p \simeq 1$, и наблюдается квадратичный закон изменения тока с напряжением, характерный для тока в полупроводниках с участием ловушек, $I \sim V^2$, идет захват дырок центрами N_{t1} и N_{t2} , введенные в слой SiN темновые (с $\beta_n \neq 1$) или световые электроны эффективно рекомбинируют с ними. Никакого усиления фототока в этом случае нет (рис. 2, кривая 2). Хотя рассмотренная качественная картина с участием трех центров и объясняет основные особенности токопереноса и фотоэлектрических явлений, есть основания считать, что набор глубоких уровней гораздо шире. Это тем более справедливо в изученных нами слоях нитрида кремния с относительно высокой проводимостью и, следовательно, с нарушенными диэлектрическими свойствами. Изученные структуры, однако, проявляющие эффект усиления фототока, помимо возможного практического применения представляют дополнительный интерес как объекты исследования влияния роли и природы различных химических примесей и дефектов в механизме токопереноса в слоях Si_3N_4 с хорошими диэлектрическими характеристиками.

Список литературы

- [1] P.C. Arnett, Z.A. Weinberg. IEEE Trans. Electron. Dev., ED-25, 1014 (1978).
- [2] S.M. Sze. J. Appl. Phys. 38, 2951 (1967).
- [3] J. Robertson. J. Appl. Phys., 54, 4490 (1983).
- [4] Э.И. Адирович, П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. Токи двойной инжекции в полупроводниках (М., Сов. радио, 1978) т. 2, с. 73.
- [5] H.J. Stein, S.T. Picraux, P.Y. Holloway. IEEE, Trans. Electron. Dev., ED-25, 1008 (1978).

- [6] Г.Г. Ковалевская, М.М. Мередов, Е.В. Руссу, Х.М. Салихов, С.В. Слободчиков. ЖТФ, **63**, 185 (1993).
[7] В.И. Стафеев. ФТТ, **1**, 841 (1959).
[8] Г.Г. Ковалевская, В.И. Алюшина, С.В. Слободчиков. ФТП, **11**, 2125 (1975).

Редактор Л.В. Шаронова

About of transport mechanism and photoelectrical characteristics of Pd-Si-p-Si structures

S.V. Slobodchikov, E.V. Russu, Ch.M. Salichov, M.M. Meredov, A.I. Yazlieva

A.F.Ioffe Physicotechnical Institute Russian Academy of Sciences
194021 St.Petersburg, Russia
