

06;12

Детекторы сверхвысокочастотного электромагнитного излучения из пористого кремния

© С. Ашмонтас, И. Градаускас, В. Загадский, И. Ступакова,
А. Сужеделис, Э. Шатковскис

Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса,
Вильнюс, Литва
E-mail: eusat@fm.vtu.lt
Институт физики полупроводников, Вильнюс, Литва
E-mail: eusat@pfi.lt

Поступило в Редакцию 12 декабря 2005 г.
В окончательной редакции 2 февраля 2006 г.

Изготовлены и исследованы два типа структур (*A* и *B*), содержащие слои пористого кремния в промежутке между двумя металлическими контактами. Структуры типа *A* обладали нелинейными, а типа *B* — линейными вольт-амперными характеристиками. Воздействие на структуры электромагнитного сверхвысокочастотного излучения вызывает возникновение электродвижущей силы. Показано, что структуры типа *B* обладают высокой вольт-ваттной чувствительностью и могут быть применимы в качестве датчиков сверхвысокочастотного излучения.

PACS: 72.30.+q, 78.55.Mb, 85.30.De

Введение. Кремний, базовый материал современной микро- и нано-электроники, повторно стал исключительно актуальным объектом детального исследования после знаменательной работы Л. Кэнэма [1], в которой автор обратил внимание на проявление эффекта размерного квантования в формируемой при электрохимическом травлении кораллоподобной системе кремниевых нитей и кластеров. К настоящему времени опубликовано большое количество работ, посвященных как физическим свойствам пористого кремния, так и созданию приборных элементов и устройств на его основе [2–6]. Много работ посвящено двухполюсным (типа диодных) структурам из пористого кремния. Такие структуры исследовались, как правило, на предмет получения эффек-

тивной электролюминесценции фотоприемников, солнечных элементов, химических, биохимических и медицинских датчиков и т.д. [3]. Обзор и анализ литературных данных показывают, однако, отсутствие сообщений о применении структур из пористого кремния для регистрации электромагнитного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения. Известны датчики для этой цели из монокристаллического кремния. Наряду с широко применяемыми в технике СВЧ полевыми транзисторами и датчиками на основе других структур [7] они успешно используются для регистрации СВЧ излучения не только большой, но и относительно малой мощности [8,9]. Особый интерес представляют датчики на эффекте разогрева свободных носителей заряда, демонстрирующие малую инерционность, высокую чувствительность и равномерность частотной характеристики в довольно широком диапазоне частот в сочетании с отсутствием областей типа $p-n$ -перехода, недостаточно устойчивых к воздействию излучения большой мощности. Чувствительность таких датчиков определяется как электрическими характеристиками материала, так и геометрическими параметрами чувствительного элемента [9]. Специфика технологии пористого кремния предоставляет дополнительные возможности для управления этими параметрами. Поэтому тема работы представляется обоснованной и актуальной. К тому же данное исследование представляет собой, по всей вероятности, первую попытку регистрации излучения сверхвысокой частоты с помощью датчиков из пористого кремния.

Эксперимент и результаты. Образцы пористого кремния изготавливались методом электрохимического травления монокристаллических пластин кремния p -типа марки КДБ с удельным сопротивлением $\rho = 0.4 \Omega \cdot \text{см}$, ориентации (100), в растворе $\text{HF} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1 : 2$. Плотность тока во время цикла травления составляла 10 и 80 mA/cm^2 , а время травления 5 и 10 min соответственно. Таким образом, пористый кремний непосредственно под металлическим контактом был более плотным, чем в глубине [5,6]. Расчетная толщина слоев пористого кремния составляла около 25 μm . Контакты изготавливали путем вакуумного напыления алюминия и последующего отжига в течение 20 min при температуре $t = 450^\circ\text{C}$ в атмосфере аргона. Для получения омических контактов на тыльной поверхности пластин создавались сплошные, дополнительно легированные p^+ -слои путем диффузии бора из боросиликатного стекла при температуре $T = 1100^\circ\text{C}$ в течение 1 h . На поверхности слоя пористого кремния омические контакты наносили

аналогичным способом, только вместо сплошного слоя алюминия через трафарет напыляли алюминиевые контактные площадки диаметром $100\ \mu\text{m}$. Были изготовлены два вида образцов. В первом случае (А) диффузия бора была сделана только с одной стороны пластины и контактные площадки алюминия напыляли на дополнительно нелегированную поверхность пористого кремния. Во втором случае (В) — диффузия бора была сделана на обеих сторонах пластины. Из пластин изготавливали образцы размерами $0.5 \times 0.6\ \text{mm}$ для помещения в измерительный СВЧ-тракт.

Качество контактов к образцам проверялось путем измерения сопротивления и вольт-амперных характеристик. Измерения проводили характериографом TR-4805 и универсальным измерителем „Agilent 4156С“. СВЧ-измерения проводились в прямоугольном волноводном тракте трехсантиметрового диапазона на частоте $f = 10\ \text{GHz}$. Излучение поступало в виде импульсов длительностью $2\ \mu\text{s}$, с частотой следования $\nu = 40\ \text{Hz}$, мощность в импульсе могла быть доведена до $1\ \text{kW}$. Образцы помещались в держателе с согласованным концентратором электрической составляющей СВЧ-поля в области образца [10]. Регистрация сигналов образца и опорных сигналов СВЧ-излучения осуществлялась осциллографом „Agilent 5464-2А“. Измерительные установки обеспечивали возможность компьютерного управления и обработки результатов измерения.

Вольт-амперные характеристики образцов типа А были нелинейными и несимметричными относительно направления тока (рис. 1). Запорное направление реализовалось при положительном потенциале на контактной площадке к пористому кремнию. Фактор неидеальности m , в соответствии с выражением для тока неидеального диода $I \sim \exp(eU/mkT)$ (здесь e — элементарный заряд, U — приложенное напряжение, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура), для этих образцов составлял величину $m \sim 10$, что наблюдалось в подобных структурах с пористым кремнием [3,11–14]. Совершенно другой вид имели вольт-амперные характеристики образцов типа В с дополнительно легированными контактными p^+ -слоями по обе стороны структуры. В том же интервале использованных напряжений они были симметричными и практически идеально линейными (рис. 1), т.е. контакты к образцам типа В были омическими. Сопротивление образцов по постоянному току варьировало в пределах $100 \div 500\ \Omega$. При расчетной толщине пористого слоя в $25\ \mu\text{m}$ оценка дает для

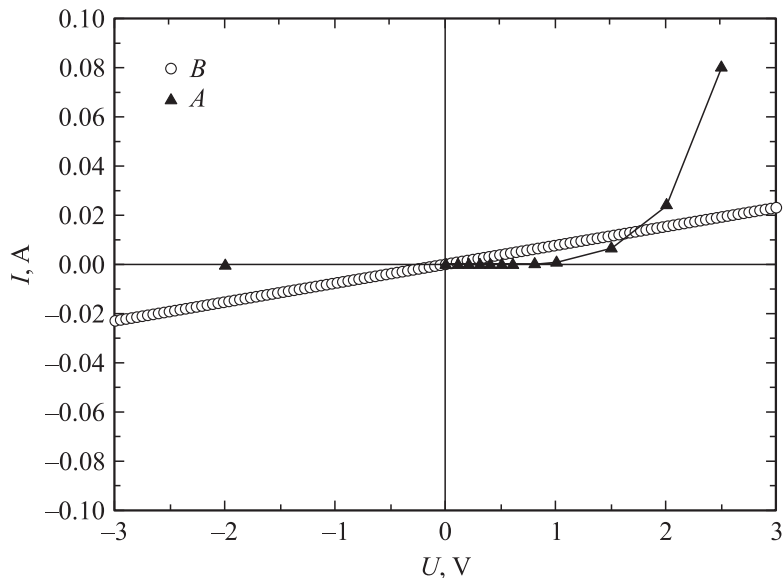


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики образцов пористого кремния типа *A* и *B*.

пористого слоя усредненное значение $\rho \sim 50 \Omega \cdot \text{см}$. Как и ожидалось, это значительно больше, чем ρ исходного материала.

СВЧ-измерения проводились без смещения, в режиме электродвижущей силы (ЭДС). Результаты измерений ЭДС представлены на рис. 2. Остановимся вначале на структурах серии *A*, в которых не было легированного p^+ -слоя со стороны пористого кремния. Помещенные в СВЧ-тракт, образцы типа *A* выдавали сигнал при уровне мощности в импульсе поступающего на них высокочастотного излучения больше 10 W. Полярность импульса возникающей ЭДС соответствовала отрицательному полюсу на основании и положительному на слое пористого кремния. Фронт импульса имел две составляющие нарастания — основную быструю, следящую за фронтом возбуждающего импульса, и медленную с постоянной около $180 \mu\text{s}$. Чувствительность датчиков типа *A* была небольшой, на уровне 30 mV/W. Другая картина наблюдалась нами при исследовании образцов типа *B*. Образцы типа *B* выдавали сигнал ЭДС при значительно меньшей мощности импульса

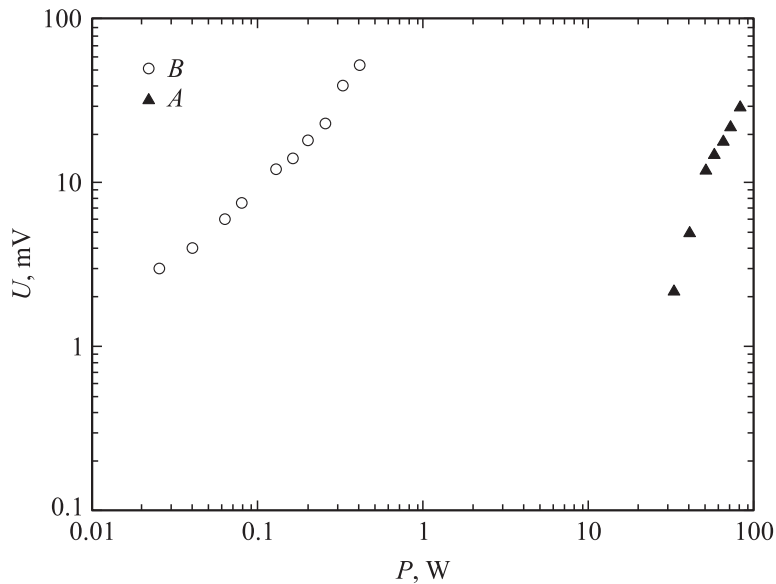


Рис. 2. Зависимость импульсной ЭДС, возникающей в структурах типа А и В на основе пористого кремния, от подводимой мощности СВЧ-излучения.

СВЧ-излучения (рис. 2). Импульс ЭДС повторял форму импульса излучения и имел полярность противоположного знака, чем в случае образцов типа А. Полярность импульса соответствовала отрицательному полюсу ЭДС на контакте к пористому кремнию и положительному на основании. Вольт-ваттная характеристика сигнала была близка к линейной, а вольт-ваттная чувствительность, как легко определить по данным на рис. 2, составляет 100 мВ/Вт. Для сравнения, вольт-ваттная чувствительность кремниевых детекторов на эффекте биградиентной ЭДС горячих электронов, изготовленных с помощью фотолитографии, также составляет сотни мВ/Вт [15].

Заключение. Малая инерционность сигнала ЭДС образцов типа В позволяет заключить, что наблюдаемый сигнал обусловлен эффектом разогрева носителей заряда (дырок). Конкретно это может быть биградиентная ЭДС в асимметричной структуре на границе пористого и монокристаллического кремния [10]. В соответствии с теорией этого

эффекта величина ЭДС и чувствительность детекторов на ее основе обратно пропорциональна квадрату размера перемычки асимметричной полупроводниковой структуры [9,10,15]. Используемая нами технология позволяет получать такие структуры на кремнии с меньшим размером перемычки, чем можно получить с помощью обычной фотолитографии. Действительно, из анализа данных по соотношению между пористостью слоя и размерами кораллоподобного остатка следует, что в нашем случае размеры перемычек могут составлять несколько десятков нанометров [3,5,6]. Это может объяснить наблюдаемую большую величину ЭДС и довольно высокую вольт-ваттную чувствительность структур. Заметим, кроме того, что исследованные нами образцы объемные и поэтому имеют преимущество перед копланарными эпитаксиальными структурами в отношении более эффективной поглощающей способности для высокочастотного излучения. Таким образом, в работе впервые показано, что структуры, содержащие слои пористого кремния, могут быть применены в качестве датчиков СВЧ-излучения.

Работа выполнена при поддержке Государственного фонда науки и образования Литвы.

Список литературы

- [1] *Canham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 10. P. 1046–1048.
- [2] *Cullis A.G., Canham L.T., Calcot P.D.J.* // Journ. Appl. Phys. 1997. V. 82. N 3. P. 909–965.
- [3] *Балагуров Л.А.* // Материаловедение. 1998. В. 1. С. 50–56; 1998. В. 3. С. 23–45.
- [4] *Bettotti P., Cazzanelli M., Dal Negro L.* et al. // Journ Phys.: Condens. Matter. 2002. V. 14. P. 8253–8281.
- [5] *Föll H., Christophersen M., Carstensen J.* et al. // Mater. Science and Engineering. 2002. V. R 39. P. 93–141.
- [6] *Lehmann V.* Electrochemistry of silicon. Weinheim: Willey-VCH, 2002. С. 296.
- [7] *Crowe T.W.* // Intern. Journ. of Infr. Millm. Waves. 1989. V. 10. N 7. P. 765–777.
- [8] *Dagys M., Kancleris Ž., Simniškis R.* et al. // Proc 14th Int. Pulsed Power Conf. Dallas, USA, June 2003. С. 189–192.
- [9] *Ašmontas S., Sužiedelis A.* // Intern. Journ. Infr. Millm. Waves. 1994. V. 15. N 3. P. 525–537.
- [10] *Ашмонтас С.* Электроградиентные явления в полупроводниках / Под ред. проф. Ю. Пожелы. Вильнюс; М., 1984. С. 182.

- [11] *Беляков Л.В., Горячев Д.Н., Сресели О.М.* и др. // ФТП. 1993. Т. 27. В. 8. С. 1371–1384.
- [12] *Жерздев А.В., Кудоярова В.Х., Медведев А.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 23. С. 87–90.
- [13] *Balagurov L.A., Bayliss S.C., Yarkin D.G.* et al. // Solid-State Electron. 2003. V. 47. N 1. P. 65–69.
- [14] *Lazarouk S., Jaguiro P., Kautsouba S.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. N 15. P. 2108–2110.
- [15] *Ašmontas S., Gradauskas J., Petkun V.* et al. // Lithuanian Journ. Phys. 2003. V. 43. N 5. P. 345–349.