

07

Детектирование сверхвысокочастотного излучения на контактах металл—пористый кремний

© Й. Градаускас^{1,2}, Й. Ступакова¹, А. Сужеделис^{1,2},
Н. Самуолене¹

¹ Вильнюсский им. Гядиминаса технический университет, LT-10223, Вильнюс, Саулетекё 11, Литва

² Центр физических и технологических наук, LT-01108, Вильнюс, Гоштауто 11, Литва
E-mail: jonas@pfi.lt

Поступило в Редакцию 1 июля 2015 г.

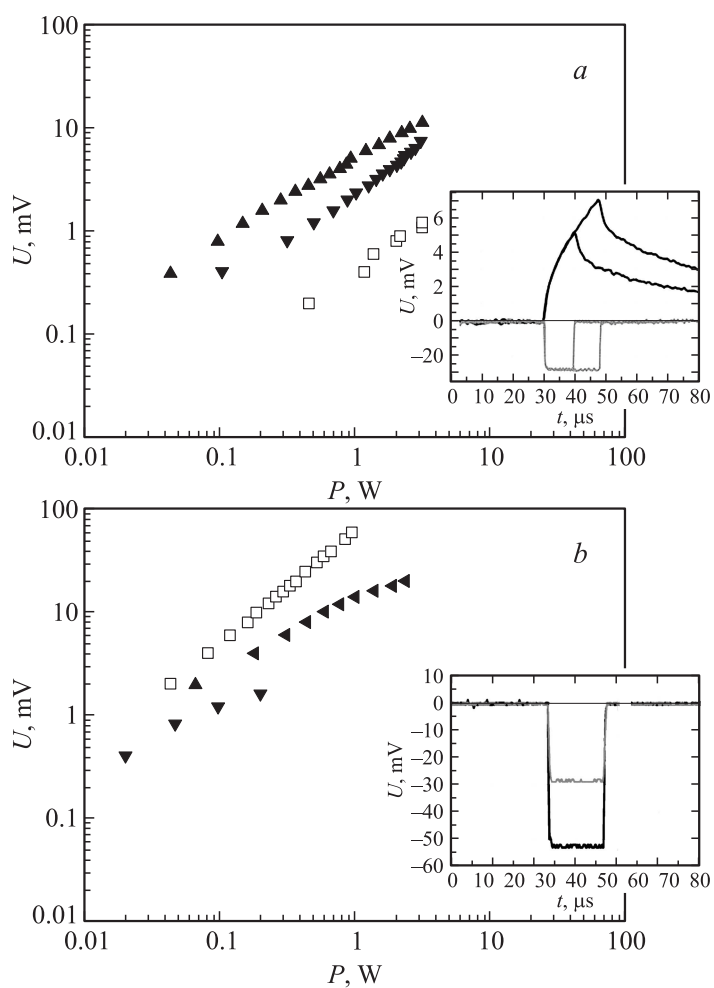
Исследовано возникновение электродвижущей силы на омических и не омических контактах металл—пористый кремний при их облучении электромагнитным излучением 10 GHz частоты. На контактах разного типа генерируется ЭДС противоположной полярности и разной скорости роста (спада). Рост ЭДС на потенциальных барьерах контактов объяснен моделью разогрева носителей заряда СВЧ-полем. Показано, что применение пористого полупроводникового слоя содержит перспективу увеличения вольт-ваттной чувствительности СВЧ детектора, а также возможность избежания эффектов точечного контакта.

Пористый кремний привлекает огромный интерес исследователей со дня его обнаружения [1] благодаря его уникальным свойствам и совместимости со стандартными кремниевыми технологическими процессами микроэлектроники. Понимание фундаментальных свойств пористого кремния открыло возможность его применения в фотовольтаике [2–4], энергетике [5], для биологических и химических обнаружений [6], в термоэлектричестве [7]. Однако до сих пор сравнительно мало известно о характере электрического транспорта носителей заряда. Электропроводимость слоев пористого кремния до частот 100 kHz [8], а также при облучении сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением была объяснена активированным прыжковым механизмом токопрохождения [9]. Уникальность СВЧ-методики не только позволяет познать характер токопрохождения, но и способствует познанию внутреннего строения

полупроводниковых структур и характера потенциальных барьеров в них. Например, при исследовании формирования электродвижущей силы (ЭДС) на пористом кремнии при воздействии СВЧ-излучением было выдвинуто предположение о существовании структуры, подобной точечному контакту в переходе между пористым слоем (*po*-Si) и кристаллической основой образца [10]. В данной работе проводится более глубокий анализ формирования отклика, и предлагаются приоритеты детектирования СВЧ-излучения на структурах металл–пористый кремний в сравнении с образцами на основе кристаллического кремния (*c*-Si).

Пористый слой формировался с одной стороны пластины монокристаллического кремния *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением $1 \Omega \cdot \text{cm}$, ориентацией (100), путем электрохимического травления в растворе $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:1$ при плотности тока 30 mA/cm^2 в течение 45 min. Сканирующим электронным микроскопом (Hitachi TM3000) установлено, что толщина *po*-Si достигала $32 \mu\text{m}$. Часть пластин была с обеих сторон легирована фосфором путем нанесения фосфосиликатного стекла методом spin-on и последующего отжига при температуре 900°C в атмосфере азота в течение 2 h. Глубина залегания примеси измерялась энергодисперсионным спектрометром (Oxford Instruments), установленным на сканирующем микроскопе. Металлические контакты к образцам размером $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$ были получены путем нанесения проводящей серебряной пасты CW2401 и дальнейшего отжига при температуре 100°C в течение получаса. Металл полностью покрывал нижнюю (не пористую) поверхность, а к пористой поверхности наносился в виде островка диаметром $\sim 100 \mu\text{m}$. Параллельно для сравнения из исходных пластин были изготовлены аналогичные образцы кристаллического кремния, не содержащие пористого слоя. Таким образом, были получены четыре типа образцов: два без дополнительного легирования (со слоем *po*-Si и без него) и соответственно два со слоем *po*-Si и без него, легированные фосфором с обеих сторон. Возбуждение производилось излучением частотой 10 GHz модулированным прямоугольным импульсом с частотой повторения 100 Hz и с максимальной мощностью в импульсе 3 W.

Вольт-амперные характеристики нелегированных образцов были нелинейные, с резко выявленной асимметрией, типичной для диодов с контактом Шоттки. Сопротивление образцов постоянному току при нулевом смещении составляло 1–4 MΩ. Аналогичные характеристики,



Зависимости ЭДС на неомических (a) и омических (b) контактах металл–кремний без пористого слоя (светлые символы) и с пористым слоем (темные символы). Для случая *po*-Si представлены две типичные характеристики. На вставках: импульсы СВЧ (светлые линии) длительностью 10 и 20 μs и соответствующие импульсы ЭДС на образце со слоем *po*-Si (темные линии).

но противоположной полярности, ранее наблюдались на образцах пористого кремния p -типа проводимости [10]. Вольт-амперные зависимости легированных образцов были почти линейные и симметричные, что характерно для омических контактов.

При облучении образцов с контактами типа Шоттки возникала ЭДС с полярностью, соответствующей СВЧ-излучению, вызванному потоком электронов со стороны объемного c -Si в направлении к пористому слою. Величина ЭДС почти линейно зависела от СВЧ-мощности (см. рисунок, *a*). На рисунке представлены две типичные характеристики образцов с po -Si, так как технология изготовления пористого кремния содержит вероятность некоторого разброса электрических параметров слоев po -Si. Вольт-ваттная чувствительность составляла порядка 2–6 мВ/Вт. При длительности возбуждающего импульса $10\ \mu\text{s}$ ЭДС, возрастая с характерной временной постоянной 150–200 μs , очевидно, не достигает своего максимального значения. Об этом свидетельствует отклик возбуждающему импульсу длительностью 20 μs (см. вставку на рисунке, *a*). Причиной медленного роста сигнала, по всей вероятности, служит большая временная постоянная цепи, обусловленная большим сопротивлением данных образцов. Образцы, не содержащие слоя po -Si, генерировали ЭДС такой же полярности и формы, но их чувствительность в лучшем случае не превышала 1 мВ/Вт.

Отклик образцов с омическими контактами на СВЧ-излучение был совсем другого характера. Генерируемая ЭДС была противоположной полярности, а ее форма полностью повторяла форму импульса модуляции СВЧ-излучения (см. вставку на рисунке, *b*). Примечательно, что образцы со слоем po -Si в этом случае проявляли более низкую вольт-ваттную чувствительность по сравнению с образцами c -Si, соответственно ~ 10 и 20–60 мВ/Вт. Примесь фосфора, измеренная энергодисперсионным спектрометром, проникала в пористый слой не более чем на 20 μm . Это означает, что легирующая примесь не достигала границы po -Si/ c -Si и не могла повлиять на формирование ЭДС на данной границе, как было предположено ранее [10]. А так как само легирование существенным образом изменило характер ЭДС, то очевидно, что генерирование ЭДС происходит на поверхностных слоях металл–полупроводник.

Так как СВЧ-излучение не способствует генерированию носителей заряда в кристаллическом кремнии, а характер импульса на пористых и непористых образцах была одинаковой, то можно заключить, что и

в пористых образцах носители заряда не генерировались. Поэтому для объяснения полярности и величины детектируемого сигнала воспользуемся моделью горячих носителей заряда [11].

Кристаллические образцы можно рассматривать как точечные контакты [12], на которых при СВЧ-облучении возникает ЭДС горячих носителей заряда U_{point} с полярностью, соответствующей потоку электронов от контакта в глубь образца. Известно, что на СВЧ-облученном контакте Шоттки, из-за перераспределения заряда в обедненной области [13], возникает ЭДС $U_{Schottky}$; ее полярность противоположного знака. Таким образом, на неомических образцах *c*-Si генерируется отклик из двух составляющих: $U_{Schottky} - U_{point}$. Тем временем на не легированном *po*-Si слое кремния, состоящего из серии параллельных брусков, увенчанных контактами Шоттки, генерируется отклик только из одной составляющей более „сильного“ $U_{Schottky}$. Это объясняет большую чувствительность пористых неомических образцов.

В легированных образцах существует потенциальный барьер $n^+ - n$ -перехода. На таком переходе из-за СВЧ-излучения возникает ЭДС $U_{n^+ - n}$ с отрицательной полярностью на *n*-стороне перехода [14]. Следовательно, в омических кристаллических образцах генерируется отклик из двух составляющих: $U_{point} + U_{n^+ - n}$, а в легированных образцах *po*-Si, состоящих из серии кремниевых брусков с поперечными $n^+ - n$ -переходами, СВЧ-облучение вызывает рост лишь одной составляющей $U_{n^+ - n}$. Поэтому их вольт-ваттная чувствительность оказывается меньшей, чем в случае аналогичных образцов *c*-Si.

Проведенные исследования способствовали открытию новых свойств пористого кремния и возможностей его применения. Для регистрации коротких импульсов СВЧ-излучения целесообразно применять пористые структуры с омическими контактами, принцип детектирования которых обоснован эффектом горячих носителей заряда. Отклик неомических контактов металл–пористый кремний на СВЧ-излучение имеет более медленный характер, однако скрывает в себе потенциал более высоких значений вольт-ваттной чувствительности, так как полная величина импульса отклика не достигается из-за сравнительно большой временной постоянной *RC* данного детектора. Но эта проблема решается обычными технологическими процессами изготовления пористого кремния, способствующими несложному достижению нужных геометрических и электрических параметров, оптимальных для получения требуемых свойств детектора. Также надо отметить, что слои пористого

кремния применимы для избежания эффекта точечного контакта, в частности для уменьшения точечного сопротивления полупроводниковой структуры.

Список литературы

- [1] *Turner D.R.* // J. Electrochem. Soc. 1958. V. 105. N 7. P. 402.
- [2] *Fang H., Li X., Song S., Xu Y., Zhu J.* // Nanotechnology. 2008. V. 19. N 25. P. 5703.
- [3] *Garnett E.C., Yang P.* // J. Am. Chem. Soc. 2008. V. 130. P. 9224.
- [4] *Шатковскис Э., Миткявичюс Р., Загадский В., Ступакова И.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 21. С. 23.
- [5] *Peng K., Jie J., Zhang W., Lee S.T.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 033 105.
- [6] *Zhang B., Wang H., Lu L., Ai K., Zhang G., Cheng X.* // Adv. Funct. Mater. 2008. V. 18. P. 2348.
- [7] *Hochbaum A.I., Chen R., Delgado R.D., Liang W., Garnett E.C., Najarian M., Majumdar A., Yang P.* // Nature. 2008. V. 451. P. 163.
- [8] *Ben-Chorin M., Möller F., Koch F.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. N 4. P. 2199.
- [9] *Stupakova J., Ašmontas S., Gradauskas J., Zagadskij V., Shatkovskis E., Sužiedėlis A.* // Acta Phys. Pol. A. 2006. V. 110. N 6. P. 817.
- [10] *Ašmontas S., Gradauskas J., Zagadsky V., Stupakova J., Suziedelis A., Shatkovskis E.* // Tech. Phys. Lett. 2006. V. 32. P. 603.
- [11] *Ашмонтас С.* Электроградиентные явления в полупроводниках. Вильнюс: Мокслас, 1984. С. 183.
- [12] *Гуога В.И., Пожела Ю.К.* // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14. В. 3. С. 565.
- [13] *Ашмонтас С.П., Олекас А.П.* // ФТП. 1980. Т. 14. В. 11. С. 2196.
- [14] *Банис Т.Я., Вебра А.И., Пожела Ю.К., Репиас К.К., Шилальникас В.И.* // Радиотехника и электроника. 1962. Т. 7. В. 9. С. 1519.