

Вольт-амперные характеристики несимметрично суженных образцов из высокоомного кремния

© С. Ашмонтас^{*†¶}, В. Клейза[†]

^{*} Институт физики полупроводников Центра физических наук и технологии, 01108 Вильнюс, Литва

[†] Паневежский институт Каунасского технологического университета, 35209 Паневежис, Литва

(Получена 5 августа 2010 г. Принята к печати 25 августа 2010 г.)

Представлены результаты исследования вольт-амперных характеристик несимметрично суженных образцов кремния электронной проводимости. Установлено, что при комнатной температуре и температуре жидкого азота асимметрия вольт-амперной характеристики исследуемых образцов в сильных электрических полях обусловлена образованием объемного заряда. При $T = 78\text{ K}$ в области теплых электронов асимметрия вольт-амперной характеристики обусловлена нелокальной связью подвижности электронов с напряженностью неоднородного электрического поля. Обнаружено, что при температуре жидкого азота сопротивление образца значительно увеличивается после приложения импульсов сильного электрического поля. Наблюдаемый эффект объясняется уменьшением концентрации электронов в суженной части образца вследствие перераспределения горячих электронов между объемом и поверхностью.

1. Введение

В работах [1–3] было установлено, что при несимметричном неоднородном разогреве носителей заряда электрическим полем в однородном изотропном полупроводнике возникает биградиентная электродвижущая сила (эдс). Неоднородное электрическое поле в однородном изотропном полупроводнике создавалось путем пропускания импульса тока большой плотности через несимметрично суженные образцы формы игла–плоскость. В суженной части образца плотность тока и, следовательно, напряженность электрического поля являются максимальными. Поскольку сужение образца является несимметричным, то и спады напряженности электрического тока по обе стороны от максимального значения будут различными, следовательно, разогрев электронного газа будет несимметричным вдоль образца. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) несимметрично суженных образцов германия и кремния показали, что при малых напряжениях, когда выполняется закон Ома, величина тока не зависит от полярности приложенного напряжения. При больших напряжениях, когда наблюдается отклонение от закона Ома, т. е. происходит разогрев электронного газа электрическим полем в суженной части образца, ВАХ становится асимметричной.

Открытие явления возникновения биградиентной эдс и асимметрии электропроводности в однородно изотропном полупроводнике [4] при несимметричном неоднородном нагревании носителей заряда позволило создать принципиально новые, однородные по легированию сверхвысокочастотные (СВЧ) диоды, работающие в широком диапазоне частот [5–7]. В работе [5] показано, что вольт-ваттная чувствительность диодов, изготовленных из арсенида галлия, не зависит от частоты СВЧ поля

в широком интервале частот, вплоть до 0.5 терагерц. При более высоких частотах чувствительность диодов начинает уменьшаться вследствие инерционности разогрева носителей зарядов СВЧ электрическим полем. В работах [6,7] с целью увеличения чувствительности СВЧ диодов предложено использовать структуры с двумерным электронным газом. Однако существенным недостатком таких диодов является то, что они могут работать лишь при достаточно малых СВЧ мощностях. Для детектирования микроволнового излучения большой мощности в работе [8] было предложено использовать планарные СВЧ диоды на основе кремния. С целью уменьшения нагрева решетки СВЧ электронным полем необходимо использовать высокоомный кремний с малой концентрацией свободных носителей заряда.

В данной работе исследуются особенности разогрева свободных носителей электронов неоднородным электрическим полем в высокоомных образцах кремния путем измерения ВАХ несимметрично суженных образцов при комнатной температуре кристаллической решетки и температуре жидкого азота.

2. Экспериментальные данные и их обсуждение

В работе исследовались несимметрично суженные образцы, изготовленные из монокристаллического кремния электронной проводимости с удельным сопротивлением, равным $500\text{ Ом} \cdot \text{см}$ (рис. 1), и кристаллографической ориентацией пластин (111). Методом термического окисления кремния на поверхности пластины создавался слой SiO_2 . Затем проводилась фотолитография для формирования областей под омические контакты. Фотошаблоны ориентировались так, чтобы продольная ось изготовленного диода была параллельна кристаллографическому направлению [110]. Это позволяло более

¶ E-mail: asmontas@pfi.lt

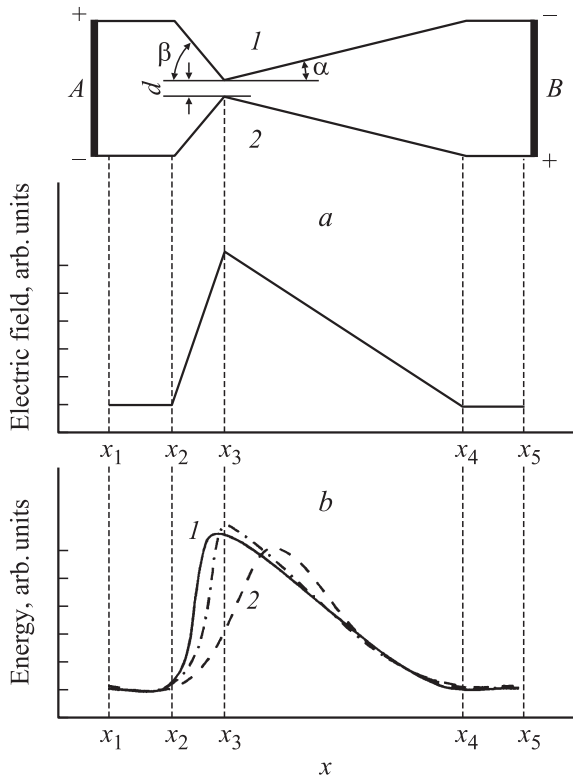


Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля (а) и средней энергии (б) электронного газа вдоль несимметрично суженного образца. Номера кривых соответствуют номерам на схеме образца.

контролируемо проводить процесс травления полупроводника для получения желаемой конфигурации планарного диода. Через окна, открытые в SiO_2 , проводилась диффузия фосфора на глубину 0.5 мкм. Концентрация фосфора в легированном слое достигала 10^{19} см^{-3} . Затем напылялся слой Al толщиной 0.5 мкм на легированные области кремния и вжигался в атмосфере аргона при температуре 500°C в течение 10 мин. Приведенное сопротивление контакта не превышало $10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Для получения конфигурации несимметрично суженного диода проводилась фотолитография и плазмохимическое травление кремния в атмосфере элегаза ($\text{SF}_6:\text{Ar} = 1:4$) на глубину 10 мкм. Затем на лицевую сторону пластины с мезаструктурами планарных диодов методом центрифугирования наносился полиамидный лак и при температуре 250°C проводилась его имидизация в течение 1 ч. Полиамидная пленка служила механическим основанием несимметрично суженного диода после утончения пластины до 12 мкм. Ширина суженной части образца d составляла 15 мкм, а углы α и β были равны 20° и 60° соответственно.

На рис. 2 показана ВАХ образца, измеренная при комнатной температуре кристаллической решетки с помощью импульсов постоянного тока длительностью 1 мкс. Из рис. 2 видно, что в сильных электрических полях $U > 100 \text{ В}$ ВАХ становится асимметричной,

т.е. при одной и той же величине приложенного напряжения ток $I^{(1)}$, соответствующий полярности приложенного напряжения, обозначенной цифрой 1 на схеме образца, больше, чем ток $I^{(2)}$. Численный расчет ВАХ образца с несимметричным сужением в приближении локальной связи между подвижностью электронов и направленностью электрического поля показывает, что в области отклонения от закона Ома $I^{(1)}$ всегда больше $I^{(2)}$ вследствие образования объемного заряда в суженной части образца [3].

При охлаждении образца ситуация существенно осложняется. На рис. 3 показаны ВАХ, измеренные при температуре жидкого азота. Видно, что при больших

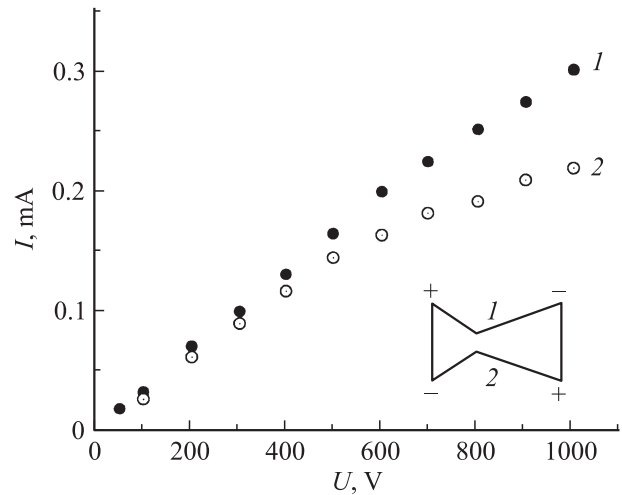


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики несимметрично суженного образца кремния при комнатной температуре. Номера кривых соответствуют номерам на схеме образца.

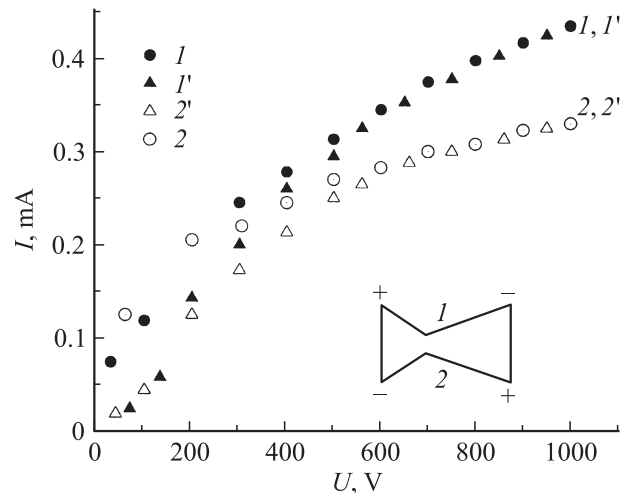


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики несимметрично суженного образца кремния при температуре жидкого азота. Номера кривых — то же, что и на рис. 2. Данные $I, 2$ относятся к первоначальному измерению, а $I', 2'$ получены при измерении ВАХ после приложения импульсов сильного электрического поля.

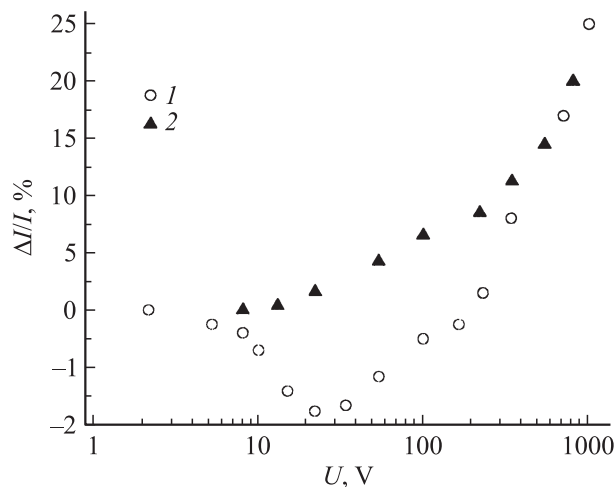


Рис. 4. Зависимости разности токов, текущих через образец, при перемене полярности приложенного напряжения. 1 — экспериментальные точки при первоначальном измерении, 2 — после приложения импульсов сильного электрического поля.

напряжения ток $I^{(1)}$ больше $I^{(2)}$, как это наблюдалось и при комнатной температуре кристаллической решетки. Однако в области теплых электронов, когда начинается отклонение от закона Ома, ток $I^{(1)}$ меньше, чем ток $I^{(2)}$. Зависимость разности токов $\Delta I = I^{(1)} - I^{(2)}$, текущих через образец, от величины приложенного напряжения представлена на рис. 4 (символы 1). Из рис. 4 видно, что при $U < 100$ В $I^{(2)}$ превышает $I^{(1)}$, а при больших напряжениях, $U > 180$ В, $I^{(1)}$ становится больше $I^{(2)}$. Асимметрию ВАХ при малых напряжениях можно объяснить нелокальной связью между подвижностью и напряженностью неоднородного электрического поля [3]. При движении электронов от катода А к аноду В (такая полярность приложенного напряжения на рис. 1 указана цифрой 2) их средняя энергия $\varepsilon^{(2)}(x)$ в области $x_2 < x < x_3$ (рис. 1) вследствие инерционности разогрева будет меньше средней энергии электронов $\varepsilon(E)$, которую они бы имели в однородном постоянном электрическом поле E , т.е. будет выполняться неравенство $\varepsilon^{(2)}(x) < \varepsilon(E)$. На рис. 1, б функция $\varepsilon(E)$ представлена штрихпунктирной линией. Поскольку в высокоомном кремнии с увеличением средней энергии электронов их подвижность уменьшается, в области x_2, x_3 будет выполняться неравенство $\mu^{(2)}(x) > \mu(E)$.

При противоположной полярности приложенного напряжения, когда электроны движутся от контакта В к А, в области $x_2 < x < x_3$ их средняя энергия будет превышать $\varepsilon(E)$. Это приводит к тому, что в суженной части образца подвижность электронов во втором случае будет больше, чем в первом, т.е. $\mu^{(2)}(x) > \mu^{(1)}(x)$. Таким образом, при одной и той же величине приложенного напряжения в области теплых электронов ток $I^{(2)}$ будет больше, чем ток $I^{(1)}$. При увеличении приложенного напряжения $U > 20$ В асимметрия ВАХ начинает

уменьшаться и при $U > 180$ В разность токов ΔI меняет знак (рис. 4). Это связано с тем, что при увеличении напряженности электрического поля в суженной части образца уменьшается инерционность разогрева электронов, и роль нелокальной связи между подвижностью электронов и напряженностью неоднородного электрического поля в возникновении асимметрии ВАХ также уменьшается по сравнению с объемным зарядом. Поэтому в сильных электрических полях асимметрия ВАХ обусловлена образованием объемного заряда в суженной части образца и, следовательно, $I^{(1)}$ становится больше $I^{(2)}$.

Следует отметить, что в сильных электрических полях при температуре жидкого азота происходит переход горячих электронов из объема полупроводника на поверхность с последующим захватом их поверхностными уровнями [9]. Это приводит к тому, что после приложения сильного электрического поля концентрация электронов в объеме полупроводника уменьшается и сопротивление образца при малых напряжениях значительно увеличивается. На рис. 3 треугольниками представлена ВАХ образца, которая измерялась при температуре жидкого азота после приложения импульсов сильного электрического поля. Видно, что при напряжениях $U < 200$ В ВАХ имеет сверхлинейный характер, что характерно для токов, ограниченных объемным зарядом [10]. Об этом также свидетельствует и тот факт, что асимметрия ВАХ во всем интервале приложенного напряжения обусловлена образованием объемного заряда в суженной части образца (рис. 4).

Следует указать, что после приложения импульсов сильного электрического поля образец в высокоомном состоянии при температуре жидкого азота в темноте может находиться довольно долго (более 5 суток). Освещение образца обыкновенной лампочкой накаливания приводит к делокализации электронов из поверхностных уровней, и сопротивление образца возвращается в исходное состояние.

3. Заключение

1) Неоднородный несимметричный разогрев электронного заряда электрическим полем приводит к возникновению асимметрии ВАХ однородного кремния. При комнатной температуре кристаллической решетки асимметрия ВАХ высокоомного кремния в основном обусловлена образованием объемного заряда в суженной части образца. При температуре жидкого азота асимметрия ВАХ в области теплых электронов обусловлена нелокальной связью подвижности электронов с напряженностью неоднородного электрического поля. В области сильных электрических полей асимметрия ВАХ в основном обусловлена образованием объемного заряда в суженной части образца.

2) В сильных электрических полях при температуре жидкого азота происходит переход горячих электронов

из объема полупроводника на поверхность с последующим захватом их поверхностными уровнями. Вследствие этого, после приложения импульсов сильного электрического поля концентрация электронов в объеме полупроводника уменьшается, что ведет к значительному увеличению сопротивления образца при малых смещениях на омическом участке ВАХ.

Список литературы

- [1] С. Ашмонтас, Ю. Пожела, К. Репшас. Лит. физ. сб., **11** (2), 243 (1971).
- [2] С. Ашмонтас, Ю. Пожела, К. Репшас. Лит. физ. сб., **15** (2), 249 (1975).
- [3] S. Ašmontas. Phys. Status Solidi A **31**, 409 (1975).
- [4] С. Ашмонтас, Ю. Пожела, К. Репшас. Диплом № 185 [Бюл. изобрет., № 39, 1 (1977)].
- [5] S. Ašmontas, A. Sužiedėlis. Intern. J. Infr. Millimeter Waves, **15** (3), 525 (1994).
- [6] A. Sužiedėlis, J. Gradauskas, S. Ašmontas, G. Valušis, H.G. Roskos. J. Appl. Phys., **93** (5), 3034 (2003).
- [7] G. Valušis, D. Seliuta, V. Tamošiūnas, E. Širmulis, S. Balakauskas, J. Gradauskas, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, T. Anbinderis, A. Nasrkūnas, I. Papsueva, A. Lisauskas, H.G. Roskos. Acta Phys. Polon. A, **107** (1), 184 (2005).
- [8] S. Ašmontas, J. Gradauskas, V. Petkun, A. Sužiedėlis. Lithuan. J. Phys., **43** (5), 345 (2003).
- [9] Z.S. Gribnikov, K. Hess, G.A. Kosinovsky. J. Appl. Phys., **77** (4), 1337 (1995).
- [10] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).

Редактор Т.А. Полянская

Current-voltage characteristics of high-resistivity silicon asymmetrically necked samples

S. Ašmontas^{*+}, V. Kleiza⁺

^{*} Semiconductor Physics Institute
of Center for Physical Sciences and Technology,
01108 Vilnius, Lithuania

⁺ Panevėžys Institute
of Kaunas University of Technology,
35209 Panevėžys, Lithuania

Abstract Results of the investigation of current-voltage ($I-V$) characteristics of an asymmetrically necked sample of n -type silicon are presented. It is established that the asymmetry of $I-V$ characteristics of investigated samples is caused by the formation of space charge in high electric field at room and liquid nitrogen temperatures. For warm electron region the asymmetry of $I-V$ is caused by nonlocal relation between the electron mobility and the nonuniform electric field at $T = 78$ K. At liquid nitrogen temperature the sample resistance is found to substantially increase after applying high electric field pulses. This effect is explained by decreasing electron concentration in necked part of the sample due to the redistribution of hot electron between volume and surface.