

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ И ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТИ РЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПЕДАНСА *pn*-ПЕРЕХОДОВ НА КРЕМНИИ

Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук, С.В. Шпаковский

Белорусский государственный университет, пр. Ф. Скорины, 4, г. Минск, 220050.  
Республика Беларусь, тел. 209-51-10, e-mail: poklonski@bsu.by

Исследовались температурная и частотная зависимости реактивных составляющих импеданса кремниевых диодов с *pn*-переходом, облученных быстрыми (средняя энергия  $E = 5$  МэВ) электронами флюенсом  $\Phi = 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Установлено, что процессы захвата и/или рекомбинации носителей заряда на радиационных дефектах приводят для частот переменного тока  $f > 1$  МГц к росту индуктивной составляющей импеданса облученных диодов при прямом смещении и уменьшению емкостной составляющей при обратном смещении. Увеличение температуры сопровождается, при прочих равных условиях, уменьшением индуктивной и увеличением емкостной составляющих импеданса облученных диодов.

### Введение

Схемотехнические аналоги индуктивности обладают низкой добротностью, малой запасенной магнитной энергией и, так же, как и пленочные катушки, занимают значительную площадь интегральной микросхемы. Поэтому практический интерес представляет разработка твердотельных аналогов катушек индуктивности. Импеданс индуктивного типа (иначе, отрицательная емкость) наблюдался в барьерных структурах на основе различных полупроводниковых материалов [1-6]. Наиболее перспективны аналоги индуктивности на кремниевых барьерных структурах, так как кремний является основным материалом для изготовления интегральных микросхем.

Облучение электронами кремниевых барьерных структур приводит к образованию в них точечных дефектов и их комплексов, например: вакансия-фосфор, вакансия-кислород, дивакансия [7-11]. Радиационные дефекты являются центрами генерации и рекомбинации носителей заряда [9-11]. Косвенно участвуя в токопереносе, радиационные дефекты обеспечивают [7] индуктивный характер импеданса барьерных структур за счет захвата и последующего выброса инжектированных носителей заряда. Заполнение радиационных ловушек инжектированными носителями заряда существенно зависит от температуры [12]. Следовательно, и индуктивность облученных барьерных структур также должна изменяться при варьировании температуры. Инерционность процесса захвата и/или рекомбинации носителей заряда предполагает наличие частотных зависимостей реактивных составляющих импеданса.

Цель работы — исследовать влияние температуры и частоты на реактивные составляющие импеданса облученных быстрыми электронами кремниевых *pn*-переходов.

### Методика эксперимента

Для изготовления диодов с *pn*-переходом использовали подложки *n*-Si:Sb толщиной 230 мкм, на которых эпитаксиально наращивался слой кремния, легированного фосфором, толщиной 70 мкм с удельным сопротивлением  $\rho = 35$  Ом·см. Область *p*-типа площадью  $S = 4.41$  мм<sup>2</sup> создавалась имплантацией ионов бора с энергией  $E = 60$  кэВ; доза имплантации составила  $D = 100$  мкКл/см<sup>2</sup>. Отжиг дефектов, вводимых ионным легированием, выполнялся в окислительной ат-

мосфере при температуре  $T_{ан} = 1200$  °С в течение 7 часов. Для создания омических контактов с планарной стороны напылялся Al толщиной  $d = 4.5$  мкм, с обратной стороны напылялась трехслойная металлизация Ti:Ni:Ag толщиной  $d = 1.2$  мкм. На линейном ускорителе готовые диодные структуры подвергались облучению быстрыми (средняя энергия  $E = 5$  МэВ) электронами флюенсом  $\Phi = 10^{16}$  см<sup>-2</sup>.

Для модификации дефектной структуры облученные диоды подвергались температурному отжигу при разных режимах: #1 — температура отжига  $T_{ан} = 430$  °С, время  $t = 30$  мин; #2 —  $T_{ан} = 475$  °С,  $t = 15$  мин; #3 —  $T_{ан} = 475$  °С,  $t = 45$  мин.

Индуктивная составляющая импеданса измерялась при прямом включении диодов, постоянный ток смещения изменялся от 0 до 40 мА. Измерения экспериментальных образцов выполнялись в диапазоне температур от 0 до 100 °С на измерителе иммитанса Е7-12 (частота измерительного сигнала  $f = 1$  МГц, амплитуда — 25 мВ).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ), вольт-фарадные характеристики (ВФХ) диодов, а также зависимость емкости  $C$  диодов от частоты  $f$  измерительного сигнала регистрировались по стандартной методике с использованием программно-аналитического измерительного комплекса НР 4156В.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости индуктивности  $L$  диодов, отожженных в режиме #1, от постоянного прямого тока  $I$  при температурах: 1 — 0 °С, 2 — 20 °С, 3 — 40 °С, 4 — 60 °С. На вставке рис.1 показаны измеренные при температуре 20 °С зависимости  $L(I)$  для диодов, отожженных в режимах: 1 — #1; 2 — #2; 3 — #3. Значения  $L$  усреднены по трем диодам.

Как следует из вставки рис. 1 для диодов, отожженных при температуре  $T_{ан} = 430$  °С, индуктивная составляющая импеданса на несколько порядков больше, чем для диодов, отожженных при  $T_{ан} = 475$  °С. Кроме того, согласно рис. 1, зависимость  $L(I)$  при температурах меньших 50 °С немонотонна. Максимальное значение индуктивности уменьшается при росте температуры, и зависимость  $L(I)$  в целом приобретает более плавный характер, приближаясь по виду к зависимостям  $L(I)$  для диодов, отожженных в режимах #2 и #3.

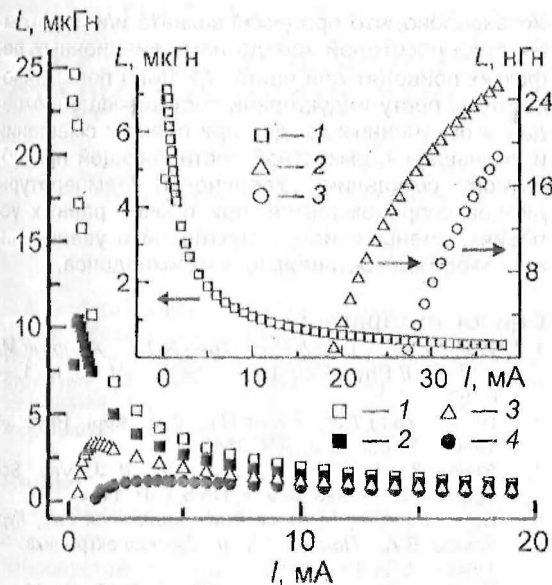


Рис. 1. Зависимость индуктивности  $L$  от тока смещения  $I$  для диода, отжигавшегося в режиме #1. Частота измерительного сигнала 1 МГц, температуры измерения: 1 — 0 °С, 2 — 20 °С, 3 — 40 °С, 4 — 60 °С. На вставке — зависимость  $L(I)$  при 20 °С для диодов, отжигавшихся в режимах: 1 — #1; 2 — #2; 3 — #3 (пояснения в тексте)

Рост (примерно на два порядка) максимального значения индуктивности диодов после их облучения связан с накоплением радиационных дефектов [7]. В облученных диодах и диодах, отжигавшихся в режиме #1, частота захвата и/или рекомбинации носителей заряда на ловушках [9–11] превышает частоту измерительного сигнала ( $f = 1$  МГц) уже при небольших уровнях инжекции. Спад индуктивности облученных  $p\text{-}n$ -переходов при токах инжекции  $I > 3$  мА обусловлен заполнением ловушек неосновными носителями заряда, в результате чего время их перезарядки становится значительно больше, чем  $1/f \sim 10^{-10}$  с.

Увеличение температуры приводит к изменению заселенности энергетических уровней, что отражается прежде всего в уменьшении максимального значения  $L$ .

Таким образом при подаче положительного напряжения смещения присутствие радиационных дефектов ведет к увеличению индуктивной составляющей импеданса. Соответственно, при отрицательном (или нулевом) напряжении смещения радиационные дефекты должны уменьшать емкостную составляющую импеданса облученных диодов. Причем, из-за инерционности процессов захвата и/или рекомбинации следует ожидать зависимости емкости облученных диодов от частоты переменного тока. На рис. 2 представлены зависимости емкости  $C$  диодов от частоты  $f$  измерительного сигнала при нулевом напряжении смещения и температуре  $T = 20$  °С. Наиболее ярко выраженная зависимость  $C(f)$  наблюдается для диодов, отжигавшихся в режиме #1.

Известно [9–11, 13], что радиационные дефекты резко уменьшают время жизни неосновных носителей заряда в Si. Наблюдаемое нами уменьшение емкости диодов при росте  $f$  происхо-

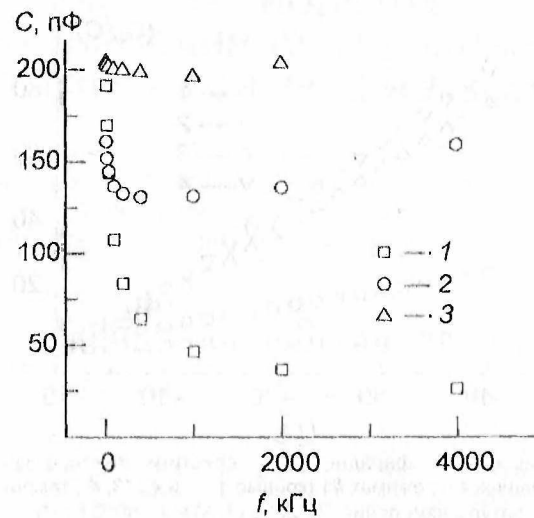


Рис. 2. Зависимость емкости  $C$  при нулевом напряжении смещения от частоты  $f$  измерительного сигнала для диодов, отжигавшихся в режимах: 1 — #1; 2 — #2; 3 — #3

дит за счет процессов захвата носителей заряда на радиационные ловушки. В результате, на высоких частотах ( $f \geq 1$  МГц) становится возможным переход от емкостной составляющей импеданса к индуктивной при токах инжекции меньших по сравнению с необлученными или отоженными в режимах #2 и #3 диодами (см. вставку рис. 1). Наличие радиационных дефектов проявляется для этих же диодов в увеличении обратного тока см. рис. 3. Для диодов, отжигавшихся в режимах #2 и #3, емкость слабее зависит от частоты измерительного сигнала, и вид вольт-амперных характеристик "приближается" к виду ВАХ необлученных диодов.

Увеличение температуры приводит к изменению заселенности ловушек носителями заряда, что проявляется в увеличении емкости  $C$  диодов при отрицательных значениях напряжения смещения. На рис. 4 в координатах  $(C_0/C)^2$  от  $U$ , где  $C_0$  — емкость при  $U = 0$ , показаны вольт-фарадные характеристики диодов, отжигавшихся

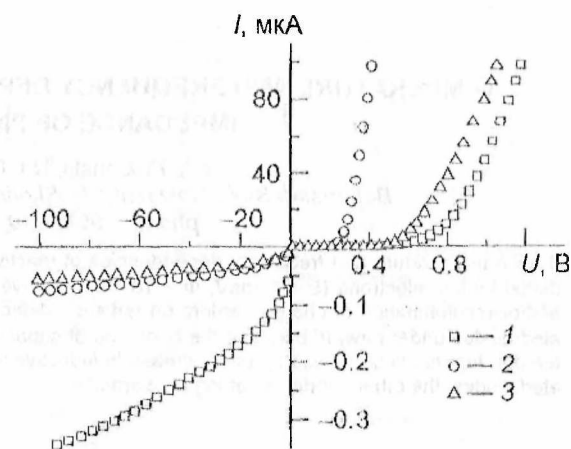


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики диодов, отжигавшихся в режимах: 1 — #1; 2 — #2; 3 — #3

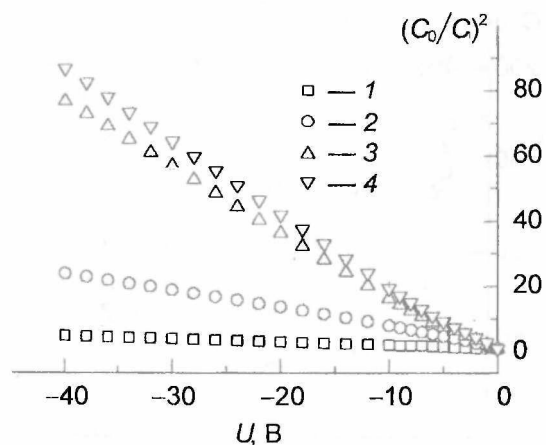


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики диодов, отжигавшихся в режимах #1 (кривые 1, 2) и #3 (3, 4), температуры измерения:  $T=20^{\circ}\text{C}$  (1, 3) и  $T=60^{\circ}\text{C}$  (2, 4). Частота измерения — 1 МГц

в режимах #1 (кривые 1, 2) и #3 (3, 4). Зависимость емкости от напряжения смещения измерялась при температурах  $T=20^{\circ}\text{C}$  (1, 3) и  $T=60^{\circ}\text{C}$  (2, 4). Частота измерения — 1 МГц. Как следует из рис. 4 повышение температуры сильнее проявляется на вольт-фарадных характеристиках диодов, прошедших термообработку в режиме #1, когда температура отжига  $T_{\text{отж}} = 430^{\circ}\text{C}$  была недостаточна для устранения большинства радиационных дефектов. В случае же режима #3, когда в диодах сохранились лишь, так называемые, остаточные дефекты изменение ВФХ при увеличении температуры с 20 до 60  $^{\circ}\text{C}$  незначительно. Это служит дополнительным подтверждением "согласованного" поведения реактивных составляющих импеданса облученных диодов и указывает на то, что их причиной являются радиационные дефекты.

#### Заключение

Итак, в работе исследованы температурные и частотные зависимости реактивных составляющих импеданса облученных кремниевых диодов.

Установлено, что процессы захвата и/или рекомбинации носителей заряда на радиационных дефектах приводят для частот  $f > 1\text{МГц}$  переменного тока к росту индуктивной составляющей импеданса облученных диодов при прямом смещении и уменьшению емкостной составляющей при обратном смещении. Увеличение температуры диодов сопровождается, при прочих равных условиях, уменьшением индуктивной и увеличением емкостной составляющих их импеданса.

#### Список литературы

1. Weerner J., Levi A.F., Tung R.T., Anzlowar M., Pinto M. // Phys. Rev. Lett. —1988. —V. 60, No 1. — P. 53.
2. Wu X., Yang T.S., Evans H.L. // J. Appl. Phys. — 1990. —V. 68, No 6. —P. 2845.
3. Steiner K., Uchitomi N., Toyoda N. // J. Vac. Sci. Technol. B. —1990. —V. 8, No 5. —P. 1113.
4. Болтаев А.П., Бурбаев Т.М., Калужная Г.А., Курбатов В.А., Пенин Н.А. // Микроэлектроника. — 1995. —Т.24, № 4. —С. 291.
5. Вейнгер А.И. // ФТП. —1978. — Т.12, № 10. — С.1986.
6. Дешевова А.С., Гасанов Л.С. // ФТП. —1977. —Т.11, №10. —С.1995.
7. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Ластовский С.Б., Лапаник А.В. // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы IV Междунар. конф., Минск, 3–5 октября 2001. / Бел. гос. ун-т. —Минск, 2001. —С. 285.
8. Пенин Н.А. // ФТП. - 1996. - Т. 30, - № 4. - С. 626–634.
9. Вавилов В.С., Горин Б.Н., Данилин Н.С., Кив А.Е., Нуров Ю.Л., Шаховцов В.И. Радиационные методы в твердотельной электронике. —М.: Радио и связь, 1990. —184 с.
10. Кузнецов Н.В., Соловьев Г.Г. Радиационная стойкость кремния. —М.: Энергоатомиздат, 1989. —96 с.
11. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. —М.: Наука, 1988. —192с.
12. Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты.— М.: Мир, 1985.— 304 с.
13. Клиняев П.М., Фистуль В.И. // ФТП. - 1990. - Т.24, - №6. - С.1118.

### TEMPERATURE AND FREQUENCY DEPENDENCES OF REACTIVE COMPONENTS OF IMPEDANCE OF PN-JUNCTION ON SILICON

N.A. Poklonski, N.I. Gorbachuk, S.V. Shpakovski  
Belarusian State University, F. Skorina av. 4. Minsk. 220050 Republic of Belarus.  
phone: 209-51-10, e-mail: poklonski@bsu.by

The temperature and frequency dependencies of reactive components of impedance of silicon diodes with *pn*-junction irradiated by fast electrons ( $E = 5\text{ meV}$ ,  $\Phi = 10^{16}\text{ cm}^{-2}$ ) have been investigated. It is established that the processes of trapping and/or recombination of charge carriers on radiation defects result in the growth of inductive impedance component of irradiated diodes under forward bias and the decrease of capacitance component under reverse bias for  $f > 1\text{ MHz}$ . The increase in temperature is accompanied by the decrease in inductive and the increase in capacitance components of impedance of irradiated diodes, the other conditions being the same.