

# Отрицательная емкость (импеданс индуктивного типа) кремниевых $p^+ - n$ -переходов, облученных быстрыми электронами

© Н.А. Поклонский<sup>¶</sup>, С.В. Шпаковский<sup>+</sup>, Н.И. Горбачук, С.Б. Ластовский\*

Белорусский государственный университет,  
220050 Минск, Белоруссия

<sup>+</sup> УП „Завод Транзистор“ НПО „Интеграл“,  
220064 Минск, Белоруссия

\* Институт физики твердого тела и полупроводников Национальной академии наук Белоруссии,  
220072 Минск, Белоруссия

(Получена 21 ноября 2005 г. Принята к печати 21 декабря 2005 г.)

Исследовались кремниевые диоды с  $p^+ - n$ -переходом, облученные быстрыми электронами (энергия  $E = 3.5 \text{ МэВ}$ , флюенс  $\Phi = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ). Индуктивность диодов ( $L$ ) измерялась на частоте  $f = 1 \text{ МГц}$  при амплитуде переменного тока  $0.25 \text{ мА}$ . Одновременно с измерением  $L$  на переменном токе через включенный в прямом направлении диод пропускался постоянный ток, что приводило к инжекции в базу неосновных носителей заряда. Для выяснения механизмов возникновения импеданса индуктивного типа в облученных диодах с  $p^+ - n$ -переходом, а также для идентификации основных радиационных дефектов, непосредственно принимающих участие в его возникновении, был проведен изохронный отжиг в диапазоне температур  $T_a = 225 - 375^\circ\text{C}$  с последующим исследованием основных характеристик дефектов методом нестационарной емкостной спектроскопии (DLTS). Показано, что импеданс индуктивного типа в облученных диодах определяется процессами захвата и удержания инжектированных в базу носителей заряда на центрах прилипания в течение времени  $\sim 1/2f$ , т.е. полупериода колебаний. Показано также, что центрами прилипания являются комплексы вакансия-кислород, вводимые облучением.

PACS: 85.30.Kk, 73.40.Lq, 71.55.Cn, 61.80.Fe

## 1. Введение

Катушки индуктивности используются в аналоговых интегральных микросхемах, колебательных контурах генераторов, в цепях коррекции частотных характеристик усилителей [1–3]. Основными способами формирования элемента цепи с индуктивным импедансом является создание пленочных металлических индуктивностей (спиралей) и имитация индуктивной нагрузки с помощью схемотехнических приемов, например, гираторов [4–6].

Планарная технология изготовления интегральных микросхем на кремнии накладывает на конструкцию индуктивностей жесткое ограничение: они должны быть в виде плоских спиралей. Из-за ограничения размеров интегральных микросхем максимальный диаметр спирали обычно не превышает 10 мм, а число витков — 100, вследствие чего величина индуктивности плоских „катушек“, как правило, меньше  $15 \text{ мкГн}$  [1], а „удельное“ (на единицу площади) значение индуктивности — несколько десятков  $\text{мкГн}/\text{см}^2$ . Имитация индуктивности схемотехническими методами (на операционных усилителях) приводит к нерациональному использованию площади чипа (см., например, [4–6]).

В связи с этим в последние годы особое внимание уделяется „отрицательной емкости“ (вид представления отрицательной реактивной проводимости), эквивалентной индуктивности. Отрицательная емкость наблюдалась в различных полупроводниковых структурах, таких как халькогенидные пленки [7], полупроводниковый поликристаллический кремний [8], мно-

гослойные гетероструктуры [9–11], границы раздела металл–полупроводник [12–15], а также в однородных (без внутренних или внешних барьеров) образцах с инерционно-релаксационным характером электропроводности [16]. Данный эффект был обнаружен также в дискретных полупроводниковых приборах: биполярных транзисторах с изолирующим затвором, диодах Шоттки, диодах с  $p^+ - n$ -переходом, изготовленных на основе кристаллических и аморфных полупроводниковых материалов [17–22].

Из всего разнообразия систем и структур, в которых наблюдался импеданс индуктивного типа, особый интерес представляют структуры с  $p - n$ -переходами, технология получения которых полностью совместима с планарной технологией интегральных микросхем. Физические механизмы, приводящие к возникновению отрицательной емкости в различных полупроводниковых структурах, существенно различаются, и многие, к сожалению, еще до конца не поняты. Например, в работе [18] предполагается, что в диодах с  $p - n$ -переходом эффект отрицательной емкости обусловлен модуляцией проводимости базы неосновными носителями при больших амплитудах переменного тока. В работе [23] установлено, что емкость прямо-смещенных диффузионных кремниевых диодов обусловлена главным образом подвижными носителями заряда в области  $p - n$ -перехода и при больших частотах малого переменного сигнала резко переходит в индуктивность. Исследование полного сопротивления диода, проведенное в работе [24], обнаружило зависимость его вещественной и мнимой частей как от постоянной составляющей тока через  $p - n$ -переход, так и от частоты сигнала. Было установлено, что

<sup>¶</sup> E-mail: poklonski@bsu.by

при некоторой плотности тока характер реактивного сопротивления диода меняется с емкостного на индуктивный.

В работах [25,26] показано, что эффект отрицательной емкости может наблюдаться в содержащих точечные дефекты и их комплексы барьерных структурах с  $p-n$ -переходом. Высказано предположение, что основную роль в формировании импеданса индуктивного типа играют центры прилипания, аккумулирующие носители заряда в течение времени порядка полупериода колебаний тока в цепи. Таким образом, в облученных электронами диодах реализуется иной механизм возникновения эффекта отрицательной емкости. Аналогичный эффект наблюдался в кремниевых фотодиодах, облученных нейтронами [27]. Авторами [27] предложено качественное описание эффекта отрицательной емкости, не учитывающее, однако, дефектно-примесную структуру облученных диодов. Таким образом, установление механизма возникновения импеданса индуктивного типа в диодных структурах является актуальной задачей, решение которой создаст предпосылки к разработке твердотельных аналогов катушек индуктивности как элементов микросхем, изготавливаемых в одном технологическом процессе.

Цель работы — исследовать облученные быстрыми электронами диоды с  $p^+ - n$ -переходом на кремнии, установить причины появления индуктивного импеданса и определить тип радиационных дефектов, ответственных за его возникновение.

## 2. Методика эксперимента

Диоды изготавливались на кремниевых пластинах, легированных сурьмой, (плоскость (111), удельное сопротивление  $\rho = 0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , толщина 460 мкм) с эпитаксиально наращённым слоем легированного фосфором кремния (толщина 70 мкм, удельное сопротивление 35 Ом · см). Область анода  $p$ -типа в эпитаксиальном слое  $n$ -типа проводимости создавалась ионной имплантацией бора (энергия 60 кэВ, доза 20 мкКл/см<sup>2</sup>) с последующим отжигом дефектов, вводимых ионным легированием, и разгонкой примеси в окислительной атмосфере при температуре 1200 °С в течение 8 ч (глубина залегания  $p^+ - n$ -перехода  $x_j \approx 12 \text{ мкм}$ ). Для создания омического контакта к  $p$ -Si с планарной стороны напылялся Al толщиной 4.5 мкм. Далее пластины утоньшались до 270 мкм, и на коллекторной стороне осуществлялась трехслойная металлизация (Ti/Ni/Ag) с суммарной толщиной слоев 1.2 мкм.

Диоды облучались при комнатной температуре электронами с энергией 3.5 МэВ. Режим облучения — импульсный, частота повторения импульсов — 200 Гц, длительность импульса — 5 мкс, плотность потока электронов в импульсе —  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , флюенс облучения составил  $\Phi = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Изохронный (20 мин) отжиг радиационных дефектов проводился в диапазоне температур  $T_a = 225 - 375 \text{ °С}$ .

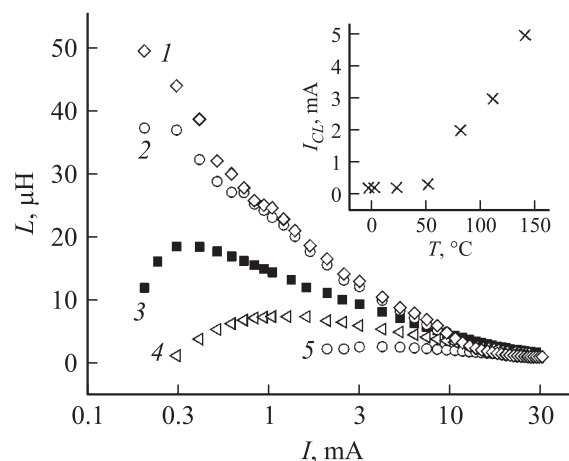
Индуктивная составляющая импеданса диодов измерялась на частоте  $f = 1 \text{ МГц}$  при амплитуде переменного тока 0.25 мА на измерителе иммитанса E7-12. Одновременно с измерением индуктивности  $L$  на переменном токе через диод пропускался прямой постоянный ток смещения, что обеспечивало стационарную инжекцию в базу неосновных носителей заряда (дырок). Концентрация инжектированных неосновных носителей варьировалась изменением силы тока смещения в диапазоне от 0 до 40 мА. Спектры DLTS диодов регистрировались в диапазоне температур  $T = 80 - 330 \text{ К}$  [28,29].

## 3. Результаты эксперимента

На исходных (необлученных) диодах в диапазоне токов  $I = 0 - 40 \text{ мА}$  наблюдался импеданс емкостного типа. Облучение диодов быстрыми электронами привело к возникновению импеданса индуктивного типа. На рис. 1 представлены зависимости индуктивности  $L$  облученных диодов от величины тока смещения  $I$ . Измерения проводились в диапазоне температур от  $-5$  до  $+140 \text{ °С}$ .

Как видно из рис. 1, зависимость импеданса индуктивного типа от тока смещения в диапазоне температур измерений от  $-5$  до  $+50 \text{ °С}$  имеет выраженный максимум  $L_m$  в районе 0.3–0.5 мА. Начиная с температуры  $T = 80 \text{ °С}$  максимум исчезает и  $L(I)$  представляет собой монотонную зависимость. На вставке к рис. 1 показана зависимость прямого тока  $I_{CL}$ , при котором происходит переход емкостной составляющей импеданса в индуктивную, от температуры измерения. Видно, что при росте температуры измерения  $T$  увеличивается ток  $I_{CL}$ .

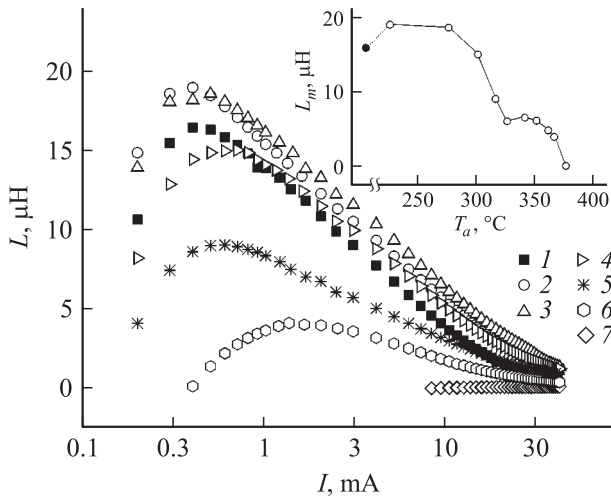
На рис. 2 представлены зависимости индуктивности от тока смещения, измеренные после изохронного отжига (20 мин) в диапазоне температур  $T_a = 225 - 375 \text{ °С}$ . Вид зависимости  $L(I)$  и значение  $L_m$  изменяется по



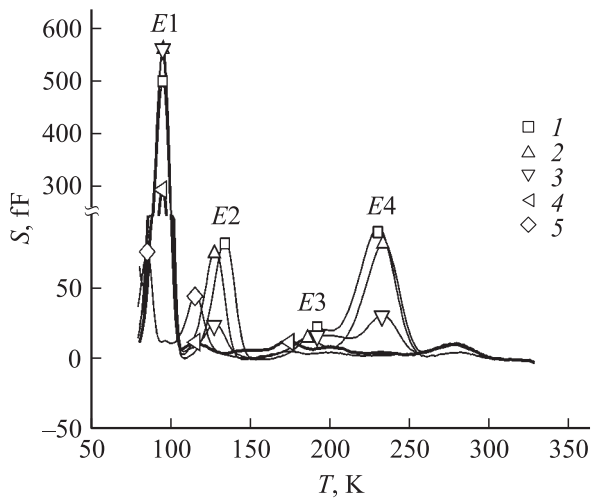
**Рис. 1.** Зависимость индуктивности  $L$  облученных ( $\Phi = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) диодов от тока смещения  $I$  при температурах измерения:  $T = -5$  (1), 0 (2), 25 (3), 50 (4), 80 °С (5). На вставке — зависимость тока смещения  $I_{CL}$ , при котором емкостная составляющая импеданса переходит в индуктивную, от температуры измерения  $T$ .

мере отжига диодов. При увеличении температуры отжига наблюдается уменьшение  $L_m$ , а также возрастает ток  $I_{CL}$  перехода емкостной составляющей импеданса в индуктивную. На вставке представлена зависимость максимального значения индуктивности  $L_m$  от температуры изохронного отжига  $T_a$  (черной точкой отмечено максимальное значение индуктивности  $L_m$  для неотожженного диода). В диапазоне температур отжига 225–275°C наблюдается незначительный рост пика индуктивности  $L_m$ , в диапазоне температур 300–365°C — плавное уменьшение  $L_m$ , полное исчезновение пика индуктивности наблюдается при  $T_a = 375^\circ\text{C}$ .

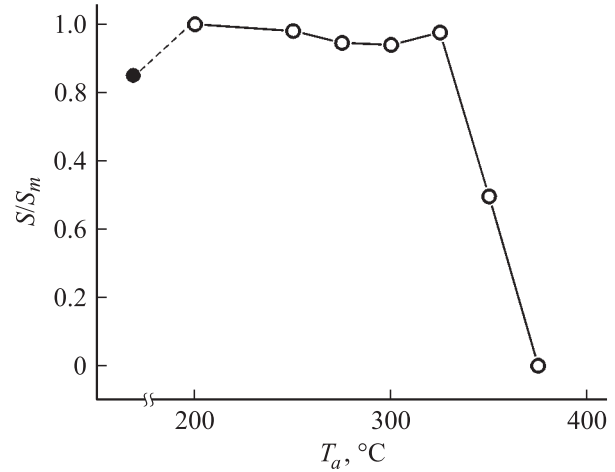
На рис. 3 представлен DLTS-сигнал ( $S$ ) облученного диода до и после изохронного отжига в диапазоне



**Рис. 2.** Зависимости индуктивности  $L$  диодов от тока смещения после облучения ( $\Phi = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) ( $I$ ) и в результате последующего изохронного отжига при  $T_a = 225$  (2), 275 (3), 300 (4), 315 (5), 365 (6), 375°C (7). На вставке — зависимость амплитуды пика индуктивности  $L_m$  от температуры изохронного (20 мин) отжига  $T_a$ .



**Рис. 3.** Спектры DLTS облученного ( $\Phi = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) диода (1) и после изохронного отжига при  $T_a = 275$  (2), 325 (3), 350 (4), 375°C (5).



**Рис. 4.** Зависимость амплитуды пика  $E1$  (вакансия–кислород), нормированной на максимальное значение, ( $S/S_m$ ) от температуры изохронного отжига  $T_a$ .

температур  $T_a = 275\text{--}375^\circ\text{C}$  в зависимости от температуры измерения  $T$ . Известно [30], и это подтверждается полученными DLTS-спектрами, что основными радиационными дефектами, вводимыми при электронном облучении в базовую  $n$ -область диодных структур, являются комплексы вакансия–кислород ( $A$ -центры) с энергетическим уровнем  $E_c - 0.19 \text{ эВ}$  и сечением захвата  $\sigma = 5.48 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$  (пик  $E1$  в спектре). В несколько меньших концентрациях вводятся также дивакансии  $V_2$  с двумя акцепторными уровнями:  $E_c - 0.25 \text{ эВ}$  и  $\sigma = 5.26 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ,  $E_c - 0.42 \text{ эВ}$  и  $\sigma = 1.17 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  (пики  $E2$  и  $E4$ ). Параметры центров, ответственных за возникновение пика  $E3$ , определить не удалось из-за плохого его разрешения.

На рис. 4 представлена зависимость амплитуды пика  $E1$  (комплекс вакансия–кислород) от температуры  $T_a$  изохронного отжига (черной точкой показано значение для неотожженного диода). Видно, что полностью комплексы вакансия–кислород отжигаются при  $T_a \approx 375^\circ\text{C}$ .

#### 4. Обсуждение результатов

Из сравнения рис. 4 и вставки к рис. 2 можно сделать вывод о том, что основную роль в формировании индуктивного импеданса облученных  $p^+ - n$ -переходов играют  $A$ -центры ( $V - O$ ). Изохронный отжиг в диапазоне температур 225–375°C приводит к изменению хода зависимости индуктивности от тока смещения. Весь температурный диапазон отжига радиационных дефектов можно условно разбить на три участка: в интервале температур 225–275°C происходит незначительное увеличение пика индуктивности; в диапазоне температур 300–365°C пик индуктивности постепенно уменьшается, и его полное исчезновение наблюдается при температуре 375°C. Анализируя зависимость  $L_m$  от температуры отжига (см. рис. 2) и спектры DLTS

(см. рис. 3), можно отметить, что незначительный рост индуктивности в процессе отжига в диапазоне температур 225–275°C, вероятно, связан с трансформацией дивакансий в комплексы дивакансия–кислород с похожей электронной структурой (см. рис. 3). На DLTS-спектрах это выражается в незначительном смещении пика  $E2$  в область более низких температур, а пика  $E4$  — в область более высоких температур. Сведения о такой трансформации приводятся в работе [30]. Пики соответствуют уже вновь образованному комплексу  $V_2-O$  с параметрами:  $E_c - 0.24$  эВ и  $\sigma = 5.6 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>,  $E_c - 0.46$  эВ и  $\sigma = 6.3 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>. Возможно, некоторая часть дивакансий распадается с образованием А-центров, что проявляется в незначительном росте индуктивности. При дальнейшем повышении температуры происходит отжиг радиационных дефектов. В зависимостях  $L(I)$  это проявляется как уменьшение амплитуды пика индуктивности  $L_m$  при росте температуры отжига  $T_a$ . По рис. 3 можно проследить, какие изменения происходят с амплитудой пика сигнала DLTS, связанного с радиационными дефектами вакансия–кислород. Видно, что в диапазоне температур отжига  $T_a = 250-300^\circ\text{C}$  амплитуда пика, ответственного за комплекс вакансия–кислород, практически не изменяется. А-центры (пик  $E1$ ) отжигаются лишь при  $T_a \geq 375^\circ\text{C}$  и, как следствие, полностью исчезает пик индуктивности (см. рис. 4 и вставку к рис. 2).

Отличительной чертой зависимости  $L(I)$ , наблюдаемой в облученных диодах, является наличие выраженного максимума  $L_m$  в районе 0.3–0.5 мА. Как видно из рис. 1, импеданс индуктивного типа в облученных диодах сильно зависит от уровня инжекции и температуры. В то же время известно, что оба эти параметра определяют положение квазиуровня Ферми, от которого в свою очередь зависит, является ли ловушка центром захвата (прилипания) или центром рекомбинации. Поэтому, если индуктивность определяется захватом и удержанием в течение времени порядка полупериода колебаний на центре прилипания носителя заряда, то ее величина будет зависеть от того, сколько в диоде присутствует центров прилипания и как они „заселены“.

Охарактеризовать соотношение процессов захвата и рекомбинации количественно можно с помощью отношения скорости (темпа) теплового заброса основных носителей заряда из ловушек в соответствующую разрешенную энергетическую зону к скорости захвата неосновных носителей заряда. Энергетический уровень ловушки, для которого темпы захвата дырок из валентной зоны и теплового выброса электрона в зону проводимости одинаковы, называется демаркационным уровнем [31]:

$$E_{dn} = - \left( F_p^{(v)} - k_B T \ln \frac{\gamma_n m_n^{3/2}}{\gamma_p m_p} \right) > 0, \quad (1)$$

где  $\gamma_n$  — произведение тепловой скорости электрона с эффективной массой  $m_n$  на сечение захвата его центром, энергетический уровень которого располагается

на  $E_{dn}$  ниже дна зоны проводимости;  $\gamma_p$  — произведение тепловой скорости дырки с эффективной массой  $m_p$  на сечение захвата ее этим же центром;  $F_p^{(v)} < 0$  — уровень Ферми для дырок, отсчитанный от потолка валентной зоны;  $k_B T$  — тепловая энергия.

При инжекции дырок в  $n$ -базу  $p^+ - n$ -диола квазиуровень Ферми дается выражением  $F_p^{(v)}(p + \Delta p) = F_p^{(v)}(p) + k_B T \ln(1 + \Delta p/p) < 0$ , где  $\Delta p$  — концентрация инжектированных (избыточных) дырок,  $p$  — равновесная концентрация дырок.

Как следует из формулы (1), с увеличением уровня инжекции  $\Delta p/p$ , приводящим к росту концентрации дырок  $p + \Delta p$  в базе диода, квазиуровень Ферми ( $F_p^{(v)}(\Delta p) < 0$ ) приближается к потолку валентной зоны, а электронный демаркационный уровень ( $E_{dn} > 0$ ) приближается ко дну зоны проводимости. В этом случае будет осуществляться переход центров захвата в центры рекомбинации. Как следует из рис. 2, после прохождения максимума  $L_m$  индуктивность уменьшается пропорционально логарифму уровня инжекции, что соответствует логарифмическому уменьшению модуля энергии квазиуровня Ферми относительно потолка валентной зоны, т. е.  $|F_p^{(v)}(p + \Delta p)| < |F_p^{(v)}(p)|$ , с ростом концентрации инжектированных дырок  $\Delta p$  при  $\Delta p/p \gg 1$ .

Таким образом, при росте уровня инжекции дырок в базу диода возрастает вероятность захвата дырок отрицательно заряженными А-центрами с энергетическим уровнем  $E_c - 0.19$  эВ и уменьшается вероятность выброса электронов из А-центров в зону проводимости. Иначе говоря, А-центры перестают играть роль „аккумуляторов“ инжектированных дырок, и соответственно снижается величина  $L$ .

## 5. Заключение

Кремниевые диоды с  $p^+ - n$ -переходом, облученные быстрыми электронами ( $E = 3.5$  МэВ, флюенс  $\Phi = 4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>), в интервале токов смещения от 0.3 до 40 мА обладают импедансом индуктивного типа. Установлено, что индуктивность  $L$  облученных диодов зависит от уровня инжекции. Зависимость импеданса индуктивного типа от прямого тока через диод имеет выраженный максимум  $L_m$ , величина которого чувствительна к температуре образца: при повышении температуры  $L_m$  уменьшается, при понижении — увеличивается. Изохронный отжиг (20 мин) в диапазоне температур  $T_a = 225-365^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению максимального значения индуктивности  $L_m$  до полного исчезновения при  $T_a = 375^\circ\text{C}$ .

Показано, что индуктивность в облученных диодах с  $p^+ - n$ -переходом определяется процессами захвата инжектированных в базу диода дырок и их удержания в течение времени порядка полупериода синусоидального сигнала ( $f = 1$  МГц) на центрах прилипания. Роль центров прилипания выполняют А-центры (вакансия + атом кислорода).

## Список литературы

- [1] Дж. Гринфилд. *Транзисторы и линейные ИС: Руководство по анализу и расчету* (М., Мир, 1992).
- [2] K. Board. Rep. Prog. Phys., **48**, 1595 (1985).
- [3] К.Ф. Ибрагим. *Телевизионные приемники* (М., Мир, 2000).
- [4] Л.Н. Степанова. Зарубеж. радиоэлектрон., **5**, 79 (1991).
- [5] А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, О.Н. Негоденко, В.П. Путилин. *Полупроводниковые аналоги реактивностей* (М., Знание, 1990).
- [6] Д.В. Игумнов, Г.П. Костюнина. *Основы полупроводниковой электроники* (М., Горячая линия — Телеком, 2005).
- [7] И.Ю. Гибадатов, А.С. Глебов. Письма ЖТФ, **16** (1), 22 (1990).
- [8] K.S.A. Butcher, T.L. Tansley, D. Alexiev. Sol. St. Electron., **39** (3), 333 (1996).
- [9] А.П. Болтаев, Т.М. Бурбаев, Г.А. Калюжная, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Микроэлектроника, **24** (4), 291 (1995).
- [10] Н.А. Пенин. ФТП, **30** (4), 626 (1996).
- [11] А.П. Болтаев, Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, М.М. Рзаев, Н.А. Пенин, Н.Н. Сибельдин. Изв. РАН, **63** (2), 312 (1999).
- [12] G.V. Parravicini, A. Stella, M.C. Ungureanu, R. Kofman. Appl. Phys. Lett., **85** (2), 302 (2004).
- [13] K. Steiner, N. Uchitomi. J. Vac. Sci. Technol. B, **8** (5), 1113 (1990).
- [14] X. Wu, T.S. Yang, H.L. Evans. J. Appl. Phys., **68** (6), 2845 (1990).
- [15] А.И. Крымский, Л.К. Попов. Микроэлектроника, **19** (4), 328 (1990).
- [16] А.С. Дешевой, Л.С. Гасанов. ФТП, **11** (10), 1995 (1977).
- [17] J. Werner, A.F.J. Levi, R.T. Tung, M. Anzlowar, M. Pinto. Phys. Rev. Lett., **60** (1), 53 (1988).
- [18] M. Ershov, H.C. Liu, L. Li, M. Buchanan, Z.R. Wasilewski, A.K. Jonscher. IEEE Trans. Electron Dev., **45** (10), 2196 (1998).
- [19] M. Beale, P. Mackay. Phil. Mag. B, **65** (1), 47 (1992).
- [20] I. Omura, H. Ohashi, W. Fichtner. IEEE Electron Dev. Lett., **18** (12), 622 (1997).
- [21] T. Noguchi, M. Kitagawa, I. Taniguchi. Jap. J. Appl. Phys., **19** (7), 1423 (1980).
- [22] В.К. Jones, J. Santa, M. McPherson. Sol. St. Commun., **107** (2), 47 (1998).
- [23] Г.Б. Абдуллаев, З.А. Искендерзаде, Э.А. Джафарова. РЭ, **10** (4), 776 (1965).
- [24] С.П. Сеница. РЭ, **2**, 1427 (1962).
- [25] Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук, С.В. Шпаковский. *Взаимодействие излучений с твердым телом. Матер. V Межд. конф.*, Минск, 2003 (Минск, Бел. гос. ун-т, 2003) с. 288.
- [26] Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук, С.В. Шпаковский, С.Б. Ластовский, А.А. Шандицев. *Низкоразмерные системы — 2: Физикохимия элементов и систем с низкоразмерным структурированием (получение, диагностика, применение новых материалов и структур)*. Сб. науч. работ (Гродно, ГрГУ, 2005) с. 104.
- [27] M. McPherson. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **488**, 100 (2002).
- [28] В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. *Действие излучений на полупроводники* (М., Наука, 1988).
- [29] Ж. Бургуэн, М. Ланно. *Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты* (М., Мир, 1985).
- [30] V.P. Markevich, A.R. Peaker, S.B. Lastovskii, L.I. Murin, J.L. Lingstrom. J. Phys.: Condens. Matter, **15**, S2779 (2003).
- [31] К.В. Шалимова. *Физика полупроводников* (М., Энергоатомиздат, 1985).

Редактор Л.В. Шаронова

### Negative capacitance (inductive type impedance) of silicon $p^+ - n$ -junctions irradiated with fast electrons

N.A. Poklonski, S.V. Shpakovski<sup>+</sup>, N.I. Gorbachuk, S.B. Lastovskii\*

Belarusian State University,  
220050 Minsk, Belarus

<sup>+</sup> „Transistor Plant“ Unitary Enterprise,  
„Integral“ Research and Production Association,  
220064 Minsk, Belarus

\* Institute of Solid State and Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Belarus,  
220072 Minsk, Belarus

**Abstract** Irradiated silicon diodes with  $p^+ - n$ -junction ( $E = 3.5 \text{ MeV}$  electrons, fluence  $\Phi = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) have been investigated. Inductance  $L$  of the diodes has been measured at frequency  $f = 1 \text{ MHz}$  with alternating current amplitude of  $0.25 \text{ mA}$ . Simultaneously with  $L$  measuring at alternating current, a direct current was passed through directly switched on diode leading to injection of minority charge carriers into the base. Isochronous annealing performed in the range of temperatures  $T_a = (225 - 375)^\circ \text{C}$  followed by extraction of basic characteristics of defects by the method of deep-level transient spectroscopy (DLTS) was made for identifying mechanism of appearance of impedance of inductive type in irradiated diodes with  $p^+ - n$ -junction, and also for determining basic radiation-induced defects involved in this process. In the irradiated diodes, inductive type impedance was shown to be determined by the processes of capture and keeping on the attachment centers injected into the base charge carriers during the time of order  $1/(2f)$ , i.e. of an oscillation half-period. It was shown, that an attachment center is a vacancy–oxygen complex, induced by radiation.