

Из рис. 3 видно, что радиальный градиент концентрации кислорода в монокристаллах, выращенных автоматизированной системой управления “Кремень”, более однородный и имеет меньшее значение, чем при управлении комплексом КМ3111.

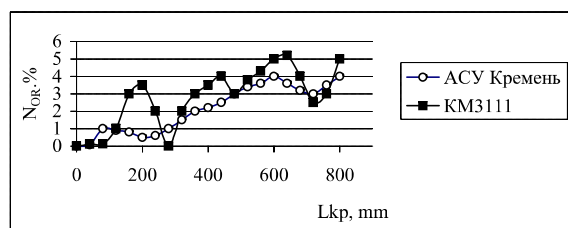


Рис. 3. Радиальный градиент концентрации кислорода в монокристаллах, выращенных АСУ “Кремень” и комплексом КМ3111

6. Выводы

Распределением кислорода по длине монокристалла кремния в процессе его роста можно управлять, уменьшая флуктуации скорости роста монокристалла. Применение автоматизированной системы управления “Кремень” позволяет достичь равномерного распределения концентрации кислорода по длине слитка и равномерного распределения радиального градиента концентрации кислорода. Отклонение распределения концентрации кислорода по длине слитка уменьшается на $0,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и радиальный градиент концентрации кислорода снижается на 1,2 %. Таким образом, применение автоматизированной системы управления “Кремень” позволяет получать монокристаллы кремния с более высокими технологическими параметрами и управлять распределением кислорода по длине монокристалла кремния.

Литература: 1. Fuller C.S., Jogan R.A. J. Appl. Phys., 1957. Vol. 28. P.1427-1436. 2. Туровский Б.М. ФТТ, 1974. Т.16, №1. С.269-271. 3. Voltmer F.M., Diggs T.G. J. Cryst. Growth, 1973. Vol.19. P.215-217. 4. Бабич В.М., Бленкан Н.И., Вернер Е.Ф. Кислород в монокристаллах кремния. К.: Интерпресс ЛТД, 1997. С. 14. 5. Барто Д., Прим Р., Шлихтер В. Распределение примесей в кристаллах, выращенных из расплава. В кн.: Германий. Сборник переводов. М.: Иностран. лит., 1955. С. 74-91. 6. Carberg T., et. al. J. Electrochem Soc., 1982. Vol. 129. P.189. 7. Ramachandran P.A., et.al. J. Electrochem Soc., 1990. Vol. 137. P.329-337. 8. Ремизов О.А. Сальников З.А. Электронная техника. Сер. Материалы, 1980, №3 (140). С.37-45. 9. Ремизов О.А., Ремизов О.А., Сальников З.А. Цветные металлы. 1982. №9. С.66-69. 10. Оксанич А.П., Притчин С.Э. Автоматизация технологического процесса получения монокристаллического кремния. В сб. “Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах”. Вып. №8 (2001). Хмельницкий. С.396-399. 11. Оксанич А.П., Притчин С.Э. Определение телевизионным способом диаметра монокристалла кремния на разных стадиях его роста. В сб. «Научные труды КГПИ». Вып. 2/2000 (8). С. 401-406. Кременчуг: КГПИ, 2000. 12. Спосіб вирощування монокристалла та пристрій для його здійснення / Третьяков О.В., Оксанич А.П., Притчин С.Е., Петренко В.Р., Слюсаренко О.А. Декларацийний патент на винахід 47988 А від 15.07.2002 р. Бюл.№7.

Поступила в редколлегию 29.01.2003

Рецензент: д-р физ-мат. наук, проф. Гордиенко Ю.Е.

Оксанич Анатолий Петрович, канд.техн.наук, профессор, проректор по НИР, г. Кременчуг. Научные интересы: исследование физических процессов в полупроводниках, разработка измерительного оборудования. Увлечение и хобби: охота. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. 50 лет СССР, 29, кв 139, тел. (05366) 38333. E-mail: oksanitch@cat-ua.com

Притчин Сергей Эмильевич, старший преподаватель кафедры КСА ИЭНТ, г. Кременчуг. Научные интересы: исследование физических процессов в полупроводниках, разработка систем управления ростовыми установками. Увлечение и хобби: радиолюбительство. Адрес: Украина, 27512, Светловодск, ул. Приморская, 18, кв.39, тел.(05236) 2-67-87. E-mail: pritchin@cat-ua.com

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАХ ДИОДНЫХ Р-Н СТРУКТУР ВАРИКАПОВ

СЛИПЧЕНКО Н.И., ПИСЬМЕНЕЦКИЙ В.А., СУПРУН Ж.М.

Рассматривается формирование динамических АЧХ варикапов с помощью входного периодического линейно-нарастающего напряжения. Анализируется зависимость емкостного тока от входного напряжения с учетом переходных процессов перезаряда барьерной емкости. Анализируются погрешности измерения ВАХ, рассматриваются методы обеспечения заданной точности ее воспроизведения. Описываются результаты эксперимента по исследованию динамических ВАХ применительно к варикапу КВ 105А.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) р-п-переходов позволяют не только оперативно контролировать их основные параметры, но выявлять такие дефекты в р-п структурах, как дислокации, дефекты упаковки, дефекты окисла (наличие ионизированных примесей), точечные дефекты и их кластеры, дефекты контактов и т.д. [1]. Диагностическими параметрами при этом являются смещение прямой ветви ВАХ, ее несимметричность, изменение уровня нелинейности прямой и обратной ветви.

Традиционный метод исследования ВАХ, т.е. в статическом режиме, где ее дискретные значения формируются при последовательных измерениях напряжений и токов, занимает много времени и недостаточно информативен, имеет низкую точность и как следствие низкую повторяемость результатов.

Интенсификация контроля ВАХ может быть достигнута, если подаваемое на диод напряжение изменять во времени по периодическому линейному закону. Тогда изменение тока за время линейного нарастания входного напряжения будет представлять во времени искомую зависимость $I=F(U)$, которая представлена на рис. 1.

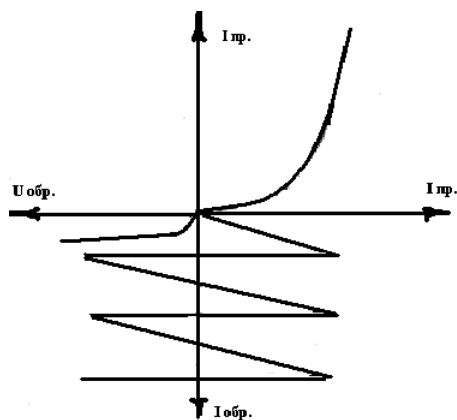


Рис. 1. Получение ВАХ

При периодическом изменении напряжения $U_{см}(t)$ смещения по пилообразному закону р-п-переход будет представлять параллельно выключенные барьерную емкость $C_б$ и сопротивление R . Следовательно, если период T изменения напряжения $U_{см}(t)$ или период сканирования $T \sim R C_б$, возникают искажения огибающей АЧХ. При этом практически формируется динамическая АЧХ или АЧХ в динамическом режиме, которая отличается от статической тем сильнее, чем выше частота сканирования. Данное явление проявляется сильнее для р-п-переходов с большими значениями $C_б$ или в случае варикапов.

Актуальность исследования. Исследование параметров варикапов представляется достаточно актуальной задачей в связи с их применением в современной приемно-усилительной электронике в качестве элементов частотной перестройки [2], определяющих как диапазон рабочих частот, так и скорость перестройки.

Цель данной работы – исследование динамических ВАХ варикапов. Основной их характеристикой является зависимость барьерной $C_б$ емкости р-п-перехода от приложенного напряжения $U_{см}(t)$.

Как известно, малосигнальная емкость C р-п-перехода подчиняется закону:

$$\varphi_б - U_{см}(t) = \frac{e\varepsilon N}{2C^2}, \quad (1)$$

где $\varphi_б$ – потенциал в барьерной области; ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника; N – поверхностная концентрация зарядов у поверхности.

Следовательно, зависимость емкости от приложенного напряжения имеет вид [3]:

$$C^2(t) = \frac{e\varepsilon N}{2[\varphi_б - U_{см}(t)]}, \quad (2)$$

$$\text{или же} \quad C(t) = \frac{K}{\sqrt{\varphi_б - U_{см}(t)}}, \quad (3)$$

$$\text{где} \quad K = \sqrt{\frac{e\varepsilon N}{2}} = \text{const}. \quad (4)$$

Так как напряжение смещения зависит от времени, то заряд на обкладках конденсатора:

$$q(t) = C(t) \cdot U(t), \quad (5)$$

$$q(t) = K \frac{U_{см}(t)}{\sqrt{\varphi_б - U_{см}(t)}}. \quad (6)$$

Ток, протекающий через конденсатор:

$$i(t) = \frac{d[q(t)]}{dt}, \quad (7)$$

$$i(t) = K \frac{U'_{см}(t)\sqrt{\varphi_б - U_{см}(t)} + \frac{U_{см}(t)}{2\sqrt{\varphi_б - U_{см}(t)}} U'_{см}(t)}{\varphi_б - U_{см}(t)}, \quad (8)$$

$$i(t) = K \frac{\varphi_б - U_{см}(t) + U_{см}(t)/2}{[\varphi_б - U_{см}(t)]^{3/2}} U'_{см}(t) = KU'_{см}(t) \frac{\varphi_б - U_{см}(t)/2}{[\varphi_б - U_{см}(t)]^{3/2}}. \quad (9)$$

Для пилообразного изменения $U_{см}(t)$ предположим, что $U_{см}(t)$ уменьшается до 0 не мгновенно, а за некоторый малый промежуток времени T . Тогда это напряжение можно описать функцией:

$$U_{см}(t) = \begin{cases} \frac{U_{\max}}{T - \Delta T} \cdot t, & t \in [0, T - \Delta T], \\ \frac{U_{\max}}{\Delta T} \cdot (T - t), & t \in [T - \Delta T, T]. \end{cases} \quad (10)$$

Следовательно,

$$U'_{см}(t) = \begin{cases} \frac{U_{\max}}{T - \Delta T}, & t \in [0, T - \Delta T], \\ -\frac{U_{\max}}{\Delta T}, & t \in [T - \Delta T, T]. \end{cases} \quad (11)$$

Подставляя $U_{см}(t)$ в равенство (9), получаем

$$i(t) = \begin{cases} K \frac{U_{\max}}{T - \Delta T} \frac{\varphi_б - \frac{U_{\max} t}{T - \Delta T}}{[\varphi_б - \frac{U_{\max} t}{T - \Delta T}]^{3/2}}; \\ -K \frac{U_{\max}}{\Delta T} \frac{\varphi_б - \frac{U_{\max} (T - t)}{\Delta T}}{[\varphi_б - \frac{U_{\max} (T - t)}{\Delta T}]^{3/2}}. \end{cases} \quad (12)$$

Тогда при слабых изменениях напряжения смещения полученный ток будет небольшим, и его зависимость от напряжения будет определяться зависимостью, приведенной для идеального диода:

$$I = I_0 (\exp(qU_{см}(t)/kT) - 1), \quad (13)$$

где I_0 – ток насыщения р-п-перехода.

При быстрых изменениях $U_{см}(t)$ вклад тока, протекающего через конденсатор емкостью C (12), оказывается заметным.

Практические результаты. В данной работе применялся автоматизированный режим измерений с помощью генератора пилообразного напряжения и регулировкой амплитуды выходного сигнала. Эта регулировка дает возможность исследовать как ВАХ в целом, так и ее прямую и обратную ветви.

Для экспериментальной проверки полученных результатов с помощью предложенной методики исследования ВАХ были измерены ВАХ варикапа КВ 105А при частотах сканирования 1, 10, и 70 кГц, представленные соответственно на рис. 2, а, б и в.



а



б



в

Рис.2. ВАХ КВ 105А на частоте: а – 1 кГц; б – 10 кГц; в – 70 кГц

На приведенных экспериментальных ВАХ четко просматривается тенденция увеличения емкостной составляющей тока с ростом рабочей частоты.

Для получения изображения ВАХ применялся и виртуальный осциллограф, реализуемый с помощью звуковой карты компьютера как низкоскоростного АЦП, работающего в диапазоне частот до 10 кГц. Построение графика исследуемой зависимости реализуется с помощью элемента Delphi Paint Box.

Для преобразования сигнала и ввода его в память компьютера используются функции операционной системы Windows - MCI (Multimedia Control Interface), т.е функции, которые управляют звуковой картой. Применение этих функций обеспечивает быстроту и надежность работы виртуального осциллографа.

Для проведения количественных измерений необходимо с учетом параметров диода правильно выбирать прецизионное нагрузочное сопротивление, с которого снимается напряжение, пропорциональное току диода.

Характерной особенностью автоматизированного измерения ВАХ является требование обеспечения заданной точности ее воспроизведения. Для оценки погрешности измерений рассмотрим уравнение РИ, 2003, № 2

прямой ветви ВАХ с учетом измерительного сопротивления R . Это уравнение имеет вид:

$$I(U) = (E - U_D) / R, \quad (14)$$

где U_D – падение напряжения на диоде, E – подводимое к схеме пилообразное напряжение.

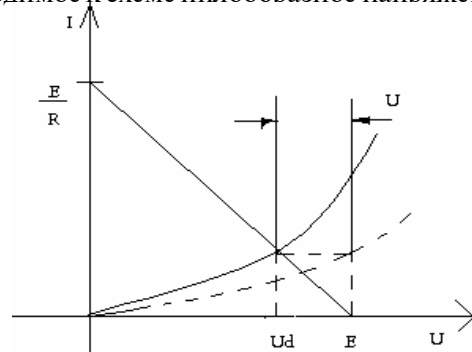


Рис. 3. Уравнение прямой ветви ВАХ

Как видно из рис. 3, часть подводимого к диоду напряжения падает на резисторе R . В результате фактически измеряемый ток соответствует меньшему напряжению ($U_D < E$). Таким образом, снимаемая ВАХ смещается вправо, что показано пунктиром. Чем больше выполняется неравенство $R \ll R_D$, тем точнее измерения. Определим взаимосвязь между E , U_D и R . Для этого проанализируем равенство

$$I = \frac{E - U_D}{R} = I(U_D), \quad (15)$$

где $I(U_D)$ – уравнение ВАХ диода. Заменяем U_D на U и получим

$$\frac{E - U}{R} = I_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right). \quad (16)$$

После преобразований имеем

$$\frac{E}{RI_0} + 1 = e^{\frac{eU}{kT}} + \frac{U}{RI_0}. \quad (17)$$

Обозначим $\frac{E}{RI_0} + 1 = a$, $\frac{kT}{e} = \beta$, $\frac{1}{RI_0} = c$.

Тогда $a = \exp(U/\beta) + cU$. (18)

Рассмотрим это уравнение при аппроксимации функции $\exp(U/\beta)$ с помощью двух членов ряда

для малых значений аргумента $\exp(U/\beta) = 1 + \frac{U}{\beta}$.

Такая аппроксимация фактически описывает уравнение $I(U)$ прямой линией. Тогда $a = 1 + \frac{U}{\beta} + cU$ и

$$U = E \cdot \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{RI_0 + \frac{kT}{e}}. \quad (19)$$

Анализ этого соотношения показывает, что если $\frac{kT}{e} \gg RI_0$, то

$$U \approx E \cdot \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{\frac{kT}{e}} \approx E. \quad (20)$$

Если неравенство не соблюдается, то

$$U = E \frac{1}{1 + \frac{1}{c\beta}} = E \frac{1}{1 + \frac{RI_0}{kT}} \quad (21)$$

Из уравнения (21) следует, что всегда в процессе измерений $U < E$. С помощью (19) проанализируем влияние измерительного сопротивления на различие между U и E в процессе формирования ВАХ. Результаты вычислений представлены на рис. 4.

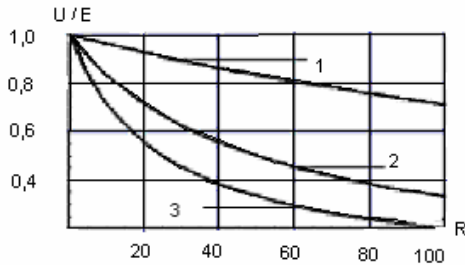


Рис. 4. Зависимость $U/E = f(R)$: 1 – при $I=0,1$ мА; 2 – при $I=0,5$ мА; 3 – при $I=1$ мА

Из приведенных графиков можно сделать вывод о том, что с ростом тока резко возрастает погрешность измерений. Однако при малых сопротивлениях R менее 10 Ом погрешности измерений для тока $I=0,1$ мА не более 5%.

Для учета нелинейности ВАХ при значениях $U \gg \frac{kT}{e}$ рассмотрим аппроксимацию $\exp(U/\beta)$ с помощью

$$\text{трех членов ряда } \exp(U/\beta) = 1 + \frac{U}{\beta} + \frac{U^2}{2\beta^2}.$$

Тогда равенство (20) преобразуется в уравнение

$$\frac{U^2}{2\beta^2} + U\left(\frac{1}{\beta} + c\right) + (1 - a) = 0. \quad (22)$$

И, соответственно, его корни

$$U_{1,2} = \beta[-(1 + \beta c) \pm \sqrt{(1 + \beta c)^2 + 2E/RI_0}], \quad (23)$$

$$\beta = \frac{kT}{e}, \quad c = \frac{1}{RI_0}, \quad a = \frac{E}{RI_0} + 1, \quad 1 - a = -\frac{E}{RI_0}.$$

Берем решение уравнения в случае корня, взятого со знаком «+», так как отрицательное значение напряжения U не имеет смысла. График зависимости прелставлен на рис. 5.

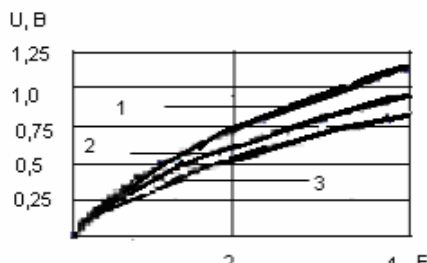


Рис. 5. Зависимость $U=f(E)$ при $I=0,1$ мА: 1 – $R=30$ Ом; 2 – $R=45$ Ом; 3 – $R=60$ Ом

Как следует из результатов вычислений на рис. 5, с ростом E возрастает погрешность измерений, которая зависит от величины измерительного сопротивления и скорости возрастания тока прямой ветви ВАХ.

Выводы. Характерной особенностью исследований является необходимость калибровки виртуального измерителя ВАХ с учетом существенного различия (как правило, на 2-3 порядка) прямого и обратного сопротивлений исследуемых диодов. Чем больше это различие, тем ниже чувствительность измерителя при заданной точности формирования АЧХ. Чтобы устранить влияние температуры на погрешность формирования ВАХ, необходимо для нагрузочного сопротивления применять высокостабильные прецизионные резисторы, а измерительную схему помещать в отдельную камеру со стабилизацией температуры. С учетом различных требований к номинальному значению R при снятии прямой и обратной ветвей ВАХ эти измерения целесообразно выполнять раздельно. Принципиально устранить влияние нагрузочного сопротивления на погрешность измерений можно в случае применения обработки выходного сигнала с помощью схемы сравнения (вычитания) пилообразного напряжения, подаваемого на диод, и снимаемого с резистора R (рис. 6).

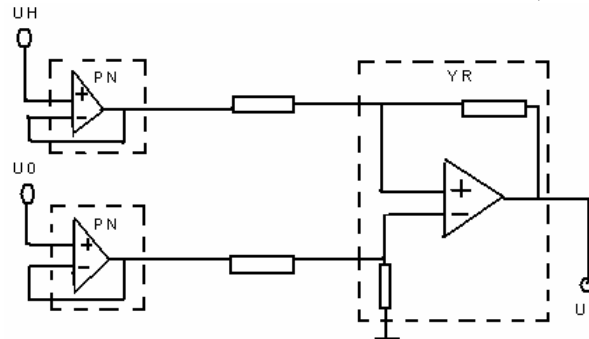


Рис. 6. Схема сравнения и вычитания, где PN – повторитель напряжения; YR – устройство получения разности

В этом случае из входного напряжения U_0 необходимо вычесть снимаемое с нагрузочного сопротивления R напряжение U_H . Разностное напряжение $U = U_0 - U_H$ будет точно соответствовать ВАХ исследуемого диода. Однако применение схемы сравнения требует обязательной предварительной установки нулевого уровня на выходе измерителя.

Литература: 1. Панасюк В.Н. Межоперационный контроль технологии в АКЗИС. Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. 1991. Вып. 4 (143). С. 54-64. 2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990. 264 с. 3. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.

Поступила в редколлегию 04.03.2003

Рецензент: д-р. физ - мат. наук, проф. Чурюмов Г.И.

Слипченко Николай Иванович, канд. техн. наук, профессор, проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: радиофизика и электроника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина,14, тел. (0572) 702-10-20.

Письменецкий Виктор Александрович, канд. техн. наук, профессор ХНУРЭ. Научные интересы: разработка устройств обработки сигналов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина,14, тел. 702-13-43.

Супрун Жанна Михайловна, аспирант ХНУРЭ. Научные интересы: анализ диодных структур и их характеристики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина,14, тел. 702-10-13.