

К. т. н. Я. Я. КУДРИК

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: bh_@mail.ru

Дата поступления в редакцию
22.09 2009 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ
(НИИ «Орион», г. Киев)

ИЗМЕРЕНИЯ ВАХ ИМПУЛЬСНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ЛПД НА УЧАСТКЕ ЛАВИННОГО ПРОБОЯ

Рассмотрены особенности измерения ВАХ импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов и использования их параметров для прогнозирования надежности ЛПД.

Известно, что из-за влияния заряда подвижных носителей при высокой плотности тока в кремниевых микроволновых диодах, в том числе лавинно-пролетных (ЛПД), возникает так называемое шнурование тока, которое зачастую является причиной катастрофических отказов ЛПД. На обратной ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) наблюдается область отрицательного дифференциального сопротивления [1, 2], что дает возможность прогнозировать отказы диодов по диагностике «шнурообразования» [3—5]. Особенно это актуально для мощных двух-пролетных ЛПД, которые работают в импульсном режиме. В данной работе рассмотрены некоторые методические аспекты измерения ВАХ подобных диодов, особенности их работы в импульсном режиме при высокой плотности обратного тока на участке развития лавинного пробоя.

Методика измерения ВАХ импульсных ЛПД

Схема измерения ВАХ ЛПД в импульсном режиме приведена на рис. 1. В эксперименте использованы тестовые импульсы длительностью 120 нс при амплитуде до 300 В на нагрузке 50 Ом. Импульс от генератора попадает на систему линий задержки. Линия задержки ЛЗ2 предназначена для разделения по времени падающего сигнала ($V_{\text{п}}$) и отраженного от исследуемого образца ($V_{\text{о}}$). Линия задержки ЛЗ4 разделяет отраженный и переотраженный от генератора импульсов сигнал. На линиях задержки ЛЗ1 и ЛЗ3 выделяются линейные комбинации падающего ($V_{\text{ак}}$) и отраженного ($V_{\text{вк}}$) импульсов, которые при определенном подборе нагрузок становятся пропорциональны импульсам напряжения V_x и тока I_x на исследуемом образце:

$$\begin{aligned} V_{\text{ак}} &= (V_{\text{п}} + V_{\text{о}})K_1 = K_1 V_x; \\ V_{\text{вк}} &= (V_{\text{пл}} - V_{\text{о}})K_2 = K_2 z I_x. \end{aligned} \quad (1)$$

где K_1, K_2 — коэффициенты пропорциональности, z — комплексная единица.

В нашем случае выбирается бесконечно большая нагрузка ЛЗ1 ($R_1 \rightarrow \infty$) и бесконечно малая нагрузка ЛЗ3 ($R_2 = 0$).

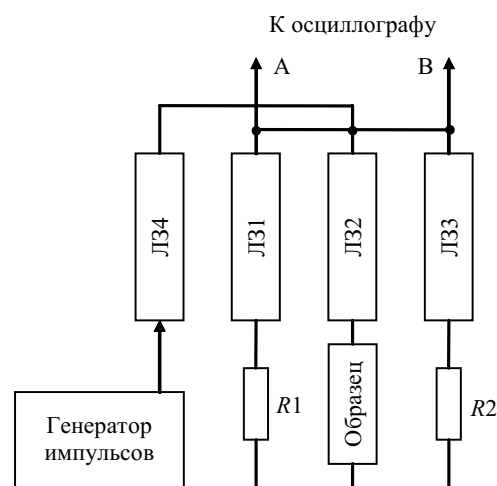


Рис. 1. Схема измерения ВАХ импульсных ЛПД

Результаты измерений и обсуждение

Рассмотрим детальнее «импульсную» ВАХ ЛПД и параметры, которые ее описывают. Общей чертой таких ВАХ является наличие участка отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), характеризующегося величиной критического тока $I_{\text{кр}}$. За участком с ОДС следует участок с очень малым дифференциальным сопротивлением (вертикальный участок), что характерно для расширения сформированного на участке ОДС «шнура» тока при постоянной плотности тока. Этот участок ярко выражен у диодов с «проколом» n -слоя, (рис. 2, кривые 1, 2) и хуже проявляется у диодов без «прокола» (кривая 3). Кроме того, ВАХ «проколотых» диодов отличаются еще и большим значением скачка напряжения ΔU на участке ОДС.

Ток в точке перехода ВАХ на участок ОДС определяется как критический. Как показали исследования, в зависимости от технологии изготовления ЛПД на его импульсной ВАХ может быть несколько точек перехода.

Измерения ВАХ ЛПД в импульсном режиме позволяют определить напряжение как однородного лавинного пробоя U_b , так и пробоя, связанного с микроплазмой. В этом случае импульсная ВАХ на участке пробоя не совпадает со статической. Для однородного лавинного пробоя значение U_b , измеренное импульсным методом, совпадает со значением, из-

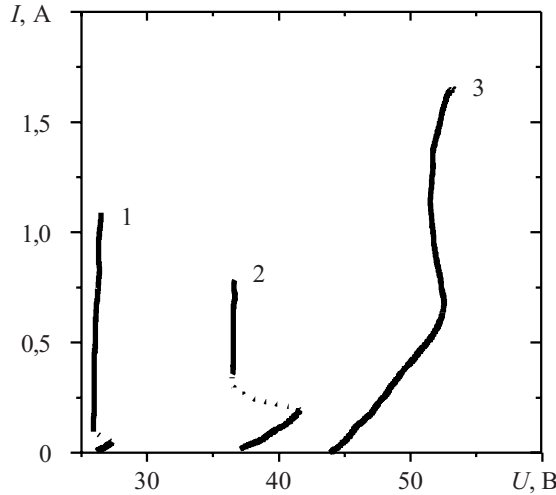


Рис. 2. ВАХ p^+-n-n^+ -диодов с проколом n -слоя (1, 2) и без прокола n -слоя (3)

меренным по производным ВАХ, и соответствует расчетному значению для резкого $p-n$ -перехода и барьера Шоттки

$$U_b = 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{1,5} \left(\frac{N_b}{10^{16}} \right)^{-0,75}, \quad (2)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника;
 N_b — концентрация донорной примеси в базе.

На линейном участке импульсной ВАХ, который следует за участком с малым дифференциальным сопротивлением (рис. 3), можно определить импульсное дифференциальное сопротивление диода R_n . Измеряя низкочастотное дифференциальное сопротивление R_n , можно определить температуру перегрева участка « $p-n$ -переход—корпус» в низкочастотном режиме работы ЛПД:

$$T_{p-n} = P_{вх} R_t + T_{корп}, \quad (3)$$

где $P_{вх}$ — входная мощность;
 R_t — тепловое сопротивление участка « $p-n$ -переход—корпус», $R_t = \frac{R_n - R_n}{\beta U_b^2}$;

β — температурный коэффициент пробоя;

$T_{корп}$ — температура корпуса.

Учитывая величину T_{p-n} и данные из [6—8], можно определить время t наработки на отказ ЛПД по формуле

$$\lg t = 10 - \frac{T_{p-n}}{40 [^\circ\text{C}]}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что каждое повышение температуры на 40°C уменьшает долговечность диода на порядок, и что для увеличения t необходимо уменьшить среднюю температуру $p-n$ -перехода. Анализ отказов ЛПД, работающих со сравнительно малыми величинами $I_{кр}$, после испытаний на надежность показал, что между количеством внезапных отказов диодов и величиной скачка напряжения на ВАХ ΔU существует корреляционная зависимость (рис. 4).

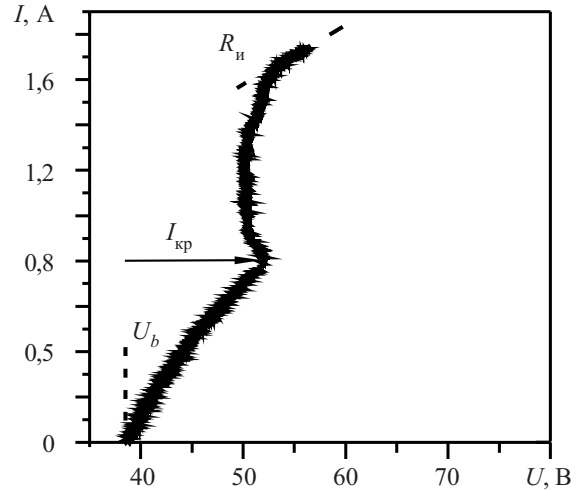


Рис. 3. ВАХ ЛПД в импульсном режиме

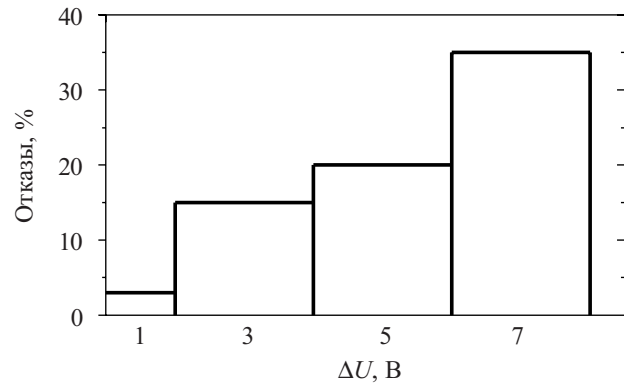


Рис. 4. Гистограмма зависимости относительного количества вышедших из строя диодов от величины ΔU

Полученные результаты необходимо учитывать при разработке физических методов прогнозирования надежности ЛПД и других типов микроволновых приборов, работающих в области лавинного пробоя $p-n$ -перехода или барьера Шоттки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Bowers H. S. Space-charge-induced negative resistance in avalanche diodes // IEEE Trans. Electron. Dev.— 1986.— Vol. ED-15, N 6.— P. 343—350.
2. Конакова Р. В., Мельникова Ю. С., Моздор Е. В., Файнберг В. И. Пробой кремниевых p^+-n-n^+ -диодов // ФТП.— 1988.— Т. 22, № 10.— С. 1754—1758.
3. Рапопорт А. Н., Файнберг В. И. Импульсные методы и средства контроля полупроводниковых приборов // Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания.— 1991.— № 3 (145).— С. 53—54.
4. Щербина Л. В., Торчинская Т. В. Шнурование тока в кремниевых p^+-n-n^+ -диодах // УФЖ.— 1983.— Т. 28, № 2.— С. 268—271.
5. Воронков И. Е., Ходневич А. Д. Неразрушающий метод определения режима возникновения лавинно-теплого пробоя $p-n$ -перехода // Электронная техника. Сер.2. Электроника СВЧ.— 1984.— Вып. 11 (371).— С. 49—55.
6. Шухостанов А. К. Лавинно-пролетные диоды. Физика. Технология. Применение.— М.: Радио и связь, 1997.
7. Давыдова Н. С., Данюшевский Ю. З. Диодные генераторы и усилители СВЧ.— М.: Радио и связь, 1986.
8. Конакова Р. В., Кордош П., Тхорик Ю. А. и др. Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов.— Киев: Наукова думка, 1986.