

06;07;12

## Неразрушающий метод диагностики глубоких уровней в полупроводниковых материалах

© Э.А. Ильичев

Государственный научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина, 103460 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 18 июля 1996 г. В окончательной редакции 3 июня 1997 г.)

Обсуждается оригинальный неразрушающий метод локальной диагностики глубоких уровней (РОСГУ) в полупроводниковых материалах, основанный на бесконтактной регистрации процессов релаксации электронно-дырочной и ловушечной систем. Он позволяет определять тип, энергию и сечение захвата глубоких энергетических центров, а также устанавливать их распределение по пластине. Метод РОСГУ эффективен для входного, межоперационного и выходного контроля подложек и арсенидгаллиевых структур и в отличие от DLTS не нуждается в изготовлении на образцах измерительных электродов.

Причинами, сдерживающими широкое применение арсенида галлия и твердых растворов на его основе в информационной технике, являются значительная дисперсия параметров активных элементов интегральных схем (ИС) по пластине [1] и неконтролируемость изменений их пороговых характеристик при фото- и термовоздействиях [2,3]. Полагают, что это обусловлено чувствительностью стехиометрического состава бинарных систем к технологическим воздействиям на материал при выращивании слитков и эпитаксиальных структур либо при проведении технологических операций в процессе формирования пластин и приборов [4–6]. Принципиальным отличием арсенидгаллиевых материалов и технологий является определяющее влияние на параметры приборов и схем как фоновых, так и специально введенных глубоких энергетических центров [7,8]. Это обуславливает необходимость контроля параметров ловушек в полупроводниковых подложках и приборных структурах при изготовлении интегральных схем. Традиционные методы измерений параметров ловушек в полупроводниках (например, DLTS) при исследовании полупроводниковых материалов неэффективны, так как требуют изготовления на образцах барьерных и омических контактов, что в системах  $A_3B_5$  вносит значительные искажения в спектр энергетических состояний границы раздела. Известные методы неразрушающей диагностики, основанные на примесном поглощении света, малоинформативны, не являются экспрессными и не пригодны для исследований приборных структур, проходящих технологический маршрут.

Настоящая работа посвящена обсуждению предложенного [9] нами метода локальной неразрушающей диагностики параметров ловушек в полупроводниковых материалах — РОСГУ (релаксационная оптоэлектронная спектроскопия глубоких уровней). Он позволяет измерять время релаксации электронно-дырочной и ловушечной систем в полупроводниковых и полупроводниковых материалах, определять тип и энергетику глубоких центров, концентрацию и сечение захвата. В образцах с концентрацией ловушек ( $N_t$ ) меньшей концентрации свободных носителей ( $n_0$ ) метод позволяет оценить

величину  $n_0$  и определить тип проводимости материала. Метод РОСГУ заключается в бесконтактной регистрации процессов релаксации электронно-дырочной и ловушечной систем в условиях периодического возбуждения их светом и квазиравновесного изменения температуры образца. Неразрушающий характер диагностики достигается тем, что нагреваемый образец размещают между обкладками конденсатора, контролируемый участок облучают сквозь одну из его обкладок электромагнитным излучением с энергией кванта, равной (либо превышающей) энергетической ширине запрещенной зоны, и с амплитудой, изменяющейся по периодическому закону. Локальность диагностики в плоскости определяется размерами светового зонда, а по глубине — эффективной диффузионной длиной. Физические явления, положенные в основу метода, связаны с генерационно-рекомбинационными процессами в облучаемом участке образца и формированием диффузионно-дрейфового потенциала. Падающий на образец свет проникает на глубину  $\alpha^{-1}$  ( $\alpha$  — коэффициент поглощения света) и в процессе диффузии, а также дрейфа в поле приповерхностной контактной разности потенциалов неравновесные носители распространяются в глубину образца, существенно меняя на длине дебаевского экранирования картину равновесной заселенности глубоких центров, создавая в указанной области объемный заряд. Это приводит к изменению характера распределения потенциала вблизи поверхности, а периодическое изменение освещенности зондируемого участка образца приводит соответственно к периодическому изменению фотопотенциала, что позволяет применить емкостные методы регистрации.

Способы регистрации и обработки сигнала в зависимости от специфики изучаемого класса материалов могут быть различными. Для диагностики полупроводниковых материалов в системе GaAs–AlAs достаточно информативным и простым в реализации является способ, при котором регистрируется ток во внешней цепи измерительного конденсатора, вызванный периодическими изменениями фотопотенциала, имеющими импульсный характер, в зондируемой светом области образца. Обра-

ботка информационного сигнала осуществляется посредством анализа температурной зависимости аппаратно сформированной функции

$$\tilde{I}(T) \approx \frac{I_0 \tau(T) \{1 - \exp[-t/\tau(t)]\}}{t},$$

где  $\tau(T)$  — время релаксации потенциала,  $t$  — текущее время,  $T$  — текущая температура образца.

Несложно показать, что указанная функция  $\tilde{I}(T)$  имеет на температурной шкале максимум при равенстве времен релаксации фотопотенциала  $\tau(T)$  (времени жизни носителя на ловушке) и времени задержки  $t^*$  между световыми импульсами, если длительность импульса существенно меньше  $t^*$ . Так как в случае моноэнергетического центра либо дискретных не взаимодействующих энергетических центров между временем жизни носителя на центре  $\tau_i$ , его энергией  $E_i^*$  и температурой образца существует связь  $\tau_i = \tau_{0i} \exp(E_i^*/kT)$ , то знание температур  $T_i^*$  соответствующих максимумам функции  $I_i(T)$  для двух и более времен задержки  $t_i^*$ , позволяет определить энергию центров

$$E_i = k \frac{T_i^* T_{i+1}^*}{T_{i+1}^* - T_i^*} \ln \left( \frac{t_{i+1}^*}{t_i^*} \right)$$

и рассчитать их сечение захвата.

При измерении концентрации глубоких уровней необходимо реализовать следующее соотношение между импедансом измерительной емкости  $Z_c$ , входным сопротивлением измерительного усилителя  $Z_{in}$ , сопротивлением растекания и объемным сопротивлением образца  $Z_n$ :  $Z_c \gg Z_n \gg Z_{in}$ . Несложно убедиться, что для проводящих и полуизолирующих материалов в системах GaAs-AlAs при частотах повторения импульсов возбуждения  $10^2 \dots 10^6$  Hz, размерах зазора между образцом и полупрозрачной обкладкой конденсатора, больших 0.1 mm, и размера светового зонда, меньших 5 mm, упомянутые соотношения между импедансами всегда выполняются. В этом случае между величиной фотоздс ( $U_\varphi$ ) и напряжением на входе измерительного усилителя ( $U_{in}$ ) выполняется следующее соотношение:

$$U_\varphi = U_{in} \frac{(R_{in} C_{in} \omega + 1)}{C_s \omega R_{in}},$$

где  $\omega$  — циклическая частота периодического светового сигнала,  $R_{in}$  — входное сопротивление усилителя,  $C_{in}$  — входная емкость усилителя,  $C_s$  — емкость измерительного конденсатора.

Учитывая, что  $t^* \gg \tau_s$  и  $C_s \ll C_r$ , (где  $\tau_s$  — постоянная времени изменительной системы,  $C_r$  — емкость "растекания"), из анализа зависимости тока через образец от изменений фотопотенциала можно получить для связи между величиной фотопотенциала  $U_\varphi$  и величиной изменения населенности ловушек  $\Delta N_i$  следующее соотношение:

$$U_\varphi \approx \frac{q \Delta N_i \Delta x^2 \tau}{\alpha C_s},$$

где  $\Delta x$  — минимальный размер светового зонда,  $q$  — элементарный заряд.

Отсюда для величины максимального изменения концентрации носителей на ловушках имеем

$$\Delta N_i \approx \frac{U_{in} (R_{in} C_{in} \omega + 1) \alpha}{R_{in} \omega q \Delta x^2 \tau}.$$

Таким образом, увеличивая интенсивность облучения до достижения фотопотенциалом максимальной величины и регистрируя время релаксации фотопотенциала  $\tau$  и напряжение на входе, усилителя  $U_{in}$ , получаем оценочную величину концентрации глубоких уровней (оценка "снизу").

В случаях, когда концентрация равновесных свободных носителей  $n_0$  превышает концентрацию ловушек, метод позволяет оценить  $n_0$ . При этом регистрируется пороговая интенсивность возбуждения, начиная с которой время релаксации фотопотенциала начинает зависеть от интенсивности "накачки" светом зондируемого участка образца. Происходит это благодаря смене линейного механизма рекомбинации "квадратичным", лишь только концентрация неравновесных носителей  $\Delta n$  становится равной концентрации равновесных  $n_0$ . Несложно показать, что в этом случае для оценки величины концентрации справедливо соотношение

$$n_0 \approx \frac{p^* \beta \tau}{\hbar \nu \alpha^{-1} \Delta x^2},$$

где  $p^*$  — пороговая мощность облучения,  $\beta$  — квантовая эффективность,  $\tau$  — время релаксации фотопотенциала,  $\hbar \nu$  — энергия кванта света,  $\alpha$  — коэффициент поглощения света материалом,  $\Delta x$  — линейный размер светового зонда.

Заметим, оценки  $n_0$  (при  $n_0 > N_i$ ) можно получать также и из анализа зависимости  $\tilde{I}(T)$ ; в этом случае в роли характерной энергии будет выступать энергия Ферми, что и позволяет рассчитать концентрацию  $n_0$  свободных носителей. Измерения  $n_0$  с использованием расчетов, базирующихся на смене механизма рекомбинации и на анализе температурной зависимости функции  $\tilde{I}(T)$ , дают согласующиеся результаты.

В [10–12] показана эффективность использования РОСГУ для локальной диагностики полуизолирующих материалов в системах  $A_3B_5$  на примерах экспериментальных исследований параметров глубоких уровней промышленных слитков полуизолирующего арсенида галлия, выращенных в условиях различного легирования элементарным хромом, а также связи электрофизических параметров GaAs интегральных схем (ИС) конкретного функционального применения с параметрами глубоких уровней подложек и приборных структур. В частности, установлена связь параметров глубоких уровней подложек и буферных слоев с характером "backgating" и "sidegating"; выяснены причины ограничивающие высокотемпературный предел работоспособности арсенид-галлиевых ИС; изучено влияние упругих напряжений как на распределение глубоких центров по пластине, так и (в ряде случаев) на энергетику глубоких центров [12]. Таким образом, использование РОСГУ эффективно на

стадиях входного контроля в производстве слитков и приборных структур для GaAs ИС, а также при межоперационном контроле. Метод полезен при изучении генерационно-рекомбинационных процессов в компенсированных материалах, а также процессов гетерирования примесей дефектами, например локальными упругими напряжениями.

## Список литературы

- [1] *H.Ch. Alt, H. Schink, G. Rackeiser* // 5<sup>th</sup> Conf. on Semi-insulating III-V Materials. Malmo (Sweden), 1988. Ch. 1. P. 512–520.
- [2] *Drummond T.J., Kopp W., Fischer R. et al.* // IEEE Electron. Dev. 1983. Vol. ED-30. N 12. P. 1806–1811.
- [3] *Valoits A.J., Robinson G.Y., Lee K., Shur M.S.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1983. Vol. 1. N 2. P. 190–195.
- [4] *Виноградов Е.Л., Дьяченко А.Г., Ильичев Э.А. и др.* // Микроэлектроника. 1991. Т. 20. N 2. С. 137–141.
- [5] *Gatos H.C., Lagowski J., Kazior T.E.* // Jap. J. Appl. Phys. 1983. Vol. 22. P. 11–19.
- [6] *Мильвидский М.Г.* Полупроводниковые материалы в современной электронике. М.: Наука, 1986. С. 143.
- [7] *Гергель В.А., Ильичев Э.А., Лукьянченко А.И., Полторацкий Э.А.* // ФТП. 1992. Т. 26. Вып. 5. С. 794–800.
- [8] *Ильичев Э.А., Онищенко В.А., Полторацкий Э.А. и др.* Тез. докл. Российской конф. "Микроэлектроника-94". Звенигород, 1994. Ч. 2. С. 387–388.
- [9] *Ильичев Э.А., Лукьянченко А.И.* А.С. № 2079853. БИ. М., 1997. № 9714.
- [10] *Ильичев Э.А., Полторацкий Э.А., Рычков Г.С., Хайновский В.И.* // Тез. докл. II Междунар. научно-техническая конф. "Микроэлектроника и информатика". М.; Зеленоград, 1997, № 2. С. 251–257.
- [11] *Ильичев Э.А., Полторацкий Э.А., Рычков Г.С., Хайновский В.И.* // Микроэлектроника. 1996. Т. 25. № 5. С. 363–369.
- [12] *Ильичев Э.А., Ступак М.Ф.* // Электрон. пром-сть. 1996. № 2. С. 3–11.