

## Комментарий к статье Е.А. Татохина, А.В. Каданцева, А.Е. Бормонтова и В.Г. Задорожного „Статистический метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней в полупроводниках“

© Н.А. Ярыкин<sup>†</sup>

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук,  
142432 Черногловка, Россия

(Получена 18 ноября 2010 г.)

Недавно опубликованная статья [1] посвящена методическим аспектам релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) [2,3]. В частности, речь идет об известной и важной проблеме DLTS: „повышении точности определения... параметров глубоких уровней“ и разрешении сигналов от центров с близкими параметрами. Цель данного комментария — показать, что в указанной работе не содержится новых подходов, и поэтому заявленные цели не достигнуты. Более того, в статье приведены неверные данные и высказывается несколько ошибочных утверждений, которые могут ввести в заблуждение знакомых с методикой недостаточно близко. Настоящий комментарий в полной мере относится и к ранее опубликованной расширенной версии статьи тех же авторов [4].

Процедура определения параметров глубоких уровней (ГУ), описанная в работе, полностью повторяет методику, предложенную Лэнгом [2]: измерение<sup>1</sup> кривых DLTS при различных комбинациях времен выборок  $t_1$  и  $t_2$  (Double boxcar), определение температур максимумов сигнала  $T_{\max}$  для каждой кривой и проведение прямой, наилучшим образом приближающей набор точек  $\{T_{\max}, t_{\max}\}$  в координатах Аррениуса, где  $t_{\max}$  дается известной комбинацией  $t_1$  и  $t_2$ .<sup>2</sup> Таким образом, при использовании метода Лэнга, точка на графике Аррениуса только тогда правильно отображает свойства *одного* ГУ, когда соответствующий ему пик на кривой DLTS слабо перекрывается с сигналами от других центров. Поскольку ширина пика DLTS мало зависит от выбора  $t_1$  и  $t_2$ , в чем легко убедиться путем анализа уравнения (9) в [1], то очевидно, что как-то улучшить ситуацию с определением параметров ГУ с перекрывающимися пиками DLTS *невозможно*, оставаясь в рамках метода Лэнга.

Возможно, понимая это, авторы в своих рассуждениях выходят за эти рамки,<sup>3</sup> но на практике строго

<sup>†</sup> E-mail: NAY@iptm.ru

<sup>1</sup> В работе [1] спектры не измеряются, а строятся на основе уже измеренного набора кривых изотермической релаксации емкости. Это обстоятельство, однако, никак не влияет на дальнейший анализ.

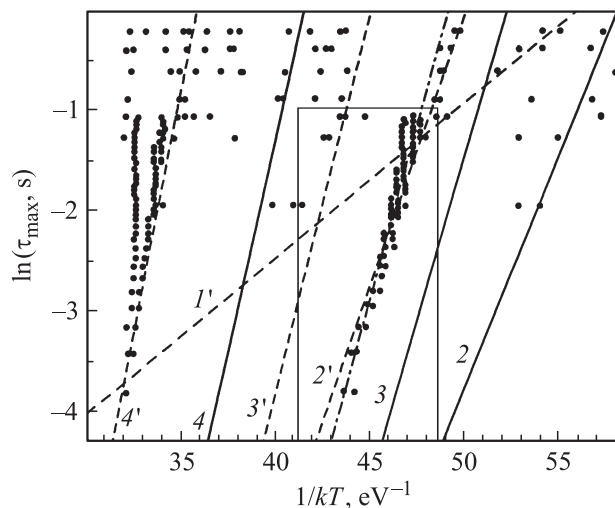
<sup>2</sup> Вызывает удивление, что существенную часть секции 2 занимает подробное изложение пионерской работы Лэнга, включающее прямое заимствование целого абзаца (последний абзац секции 2 и первый абзац на стр. 3026 в [2]).

<sup>3</sup> „... поиск на *каждой* кривой изотермической релаксации емкости (ИРЕ)“ (1-й абзац секции 4) некоего „специального“ участка  $[t_1, t_2]$  полностью извращает основную идею Лэнга: зафиксировать (практически произвольные)  $t_1$  и  $t_2$  с тем, чтобы при сканировании по температуре

следуют методу Лэнга, который не налагает никаких существенных ограничений на  $t_1$  и  $t_2$ . Поэтому ничего „инновационного“ нет в том, чтобы, как предлагается в [1], построить спектры DLTS для всех возможных пар из набора  $t_{\min}, t_{\min} + \delta t, t_{\min} + 2\delta t, \dots, t_{\max}$ , где  $t_{\min}$  и  $t_{\max}$  — времена начала и конца измерения релаксации емкости, а  $\delta t$  мало по сравнению с  $t_{\max}$ . Свой выбор авторы основывают на ошибочном предположении, что на кривых ИРЕ всегда существует интервал, где релаксацию можно аппроксимировать экспонентой, время спада которой определяется только *одним* ГУ (3-й и 4-й абзацы в правом столбце на с. 1034). В случае перекрывающихся пиков это неверно: такая аппроксимация всегда определяется параметрами всех центров, дающих вклад в комбинированный пик. Специфика вышеуказанного выбора в дальнейшем никак не используется, в то время как его недостатки очевидны. Действительно, при малых  $\Delta t = t_2 - t_1$  амплитуда пиков DLTS стремится к нулю пропорционально  $\Delta t$ , неизбежно уменьшая соотношение сигнал/шум. Легко сосчитать, что ровно половина всех пар  $t_1$  и  $t_2$  оказывается в „нехорошем“ диапазоне  $\Delta t/t_1 < 1$ . Несмотря на заверения авторов о слабой чувствительности к шуму, истинная ситуация демонстрируется верхними рядами точек на рис. 3, где для одного окна скоростей в спектре DLTS наблюдается около двадцати максимумов, почти равномерно распределенных по всему диапазону температур.

Единственная специфическая черта „статистического метода“, давшего название статье, заключается в оригинальном способе проведения прямой, наилучшим образом аппроксимирующей набор точек на плоскости. Эта известная задача рассматривается в общематематическом ключе, без учета физического смысла и статистического веса точек, но метод математически не изучен. В частности, не указана методика выбора „коридора ошибок  $\theta$ “ (второй абзац правого столбца на с. 1035) и не проанализировано влияние этой величины на точность определения параметров ГУ. Далее будет показано, что по фактической точности (в реализации авторов) „статистический метод“ намного уступает общепотребительному для решения этой задачи методу наименьших квадратов (МНК).

все ГУ „прошли“ через установленное окно скоростей (rate window) и сформировали соответствующий пик.



Фрагмент графика Аррениуса (рис. 3 из статьи [1]). Точки и выделенная область скопированы из первоисточника. Сплошные прямые построены в соответствии с параметрами из таблицы в [1] (номер прямой указывает на строку в таблице). Пунктирные прямые (пронумерованы цифрами со штрихом) соответствуют энергиям активации, скорректированным на фактор 1.16. Штрихпунктир — пример подгонки методом наименьших квадратов.

На рисунке воспроизведен фрагмент рис. 3 из статьи [1]. Точки и выделенная область были скопированы из электронной версии статьи. Сплошные прямые построены в соответствии с параметрами из таблицы в [1] (прямая 1 проходит вне границ рисунка). Видно, что эти параметры не имеют ничего общего с двумя явно различимыми группами точек, приблизительно соответствующими аррениусовским зависимостям. Таким образом, либо рис. 3, либо таблица содержат ошибочные данные. Заметим, что если умножить энергии активации из таблицы на фактор 1.16, соответствующий отличию в масштабах оси абсцисс  $10^4/T$  ( $K^{-1}$ ) и  $1/kT$  ( $eV^{-1}$ ), то соответствующие новым параметрам пунктирные линии 2' и 4' проходят вблизи упомянутых групп точек. Линии 1' и 3' (как и 1, и 3) не соответствуют никаким экспериментальным точкам, показанным на рис. 3. В этой связи напомним, что информация о ГУ в методе Лэнга извлекается только из температурного положения максимумов в спектрах. Действительно, только два максимума сигнала DLTS разрешаются в диапазоне от 200 до 360 К на рис. 2.

Результат подгонки данных в выделенной области (несколько точек в верхнем-левом углу были исключены из рассмотрения) с помощью стандартного МНК показан на рисунке штрихпунктирной линией. Видно, что МНК дает гораздо лучшую аппроксимацию экспериментальных точек, чем прямая 2', особенно в нижней части графика, где статистический вес точек выше из-за лучшего соотношения сигнал/шум. Анализ МНК приводит к энергии активации  $(0.70 \pm 0.03)$  эВ, т.е.

ошибка<sup>4</sup> не превышает 5%. Энергия активации этого уровня, взятая из таблицы и скорректированная на фактор 1.16, равняется  $(0.55 \pm 0.32)$  эВ. Оцененная авторами [1] неопределенность около 60% (!) позволяет формально утверждать, что результат совпадает с МНК. Однако с точки зрения МНК девиация „наиболее вероятного“ значения энергии, полученного „статистическим методом“, составляет 5 (!) стандартных отклонений. Таким образом, утверждение о высокой точности методики (конец предпоследнего абзаца на с. 1036) совершенно не обосновано.

## Список литературы

- [1] Е.А. Татохин, А.В. Каданцев, А.Е. Бормонтов, В.Г. Задорожный. ФТП. **44**, 1031 (2010).
- [2] D.V. Lang. J. Appl. Phys., **45**, 3023 (1974).
- [3] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. *Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках* (Л., Наука, 1981).
- [4] Е.А. Татохин, А.В. Каданцев, А.Е. Бормонтов, В.Г. Задорожный. Вестник Воронежского государственного технического университета, **5**, 40 (2009).

Редактор Л.В. Беляков

## Ответ на комментарий (Ярыкин Н.А.) к статье Е.А. Татохина, А.В. Каданцева, А.Е. Бормонтова, В.Г. Задорожного „Статистический метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней в полупроводниках“

Мы признательны автору комментария за интерес и внимательное прочтение наших работ. Задача определения концентрации и параметров глубоких уровней является актуальной, но не имеет точного решения. Если задача точно не решается, то применяются приближенные методы. Приближенных методов великое множество по той простой причине, что наилучшие методы бывают только в четко определенных классах задач. Например, функцию иногда удобно аппроксимировать рядом Фурье, иногда степенным рядом, иногда используют метод наименьших квадратов, иногда сплайны и др. Все зависит от конкретной задачи. Мы предлагаем метод решения задачи и не доказываем, что он наилучший (это не математическая работа). В некоторых случаях он может давать худшее приближение, чем тот же (указываемый автором) метод наименьших квадратов. Что остается делать в этом случае? Можно привести некоторые доводы в пользу предлагаемого метода:

1. Мы учитываем физические особенности задачи.
2. При проведении экспериментов неизбежно присутствуют ошибки и помехи. Точность измерений частично

<sup>4</sup> Речь идет об ошибке, связанной с разбросом точек. Получившаяся энергия активации кажется слишком большой для центра, определяющего пик DLTS около 250 К. Однако достоверность экспериментальных точек, приведенных на рисунке, сейчас не обсуждается.

можно повысить за счет увеличения числа экспериментов и последующей статистической обработки данных.

3. Ошибки хорошо моделируются гауссовскими случайными распределениями, поэтому в методе используется нормальное распределение.

Это позволяет нам надеяться, что в часто встречающихся случаях наш метод будет давать хорошие результаты. Эффективность метода доказывает его практическое применение. Отдельные примеры мало убедительны.