

НАБЛЮДЕНИЕ ЗАМЕДЛЕННОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В Ga_2O_3 ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

И.В. Щемеров, А.Я. Поляков, А.А. Васильев, А.И. Кочкова
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский пр. 4, Москва 119049, Россия, schemerov.iv@misis.ru

Слаболегированные плёнки $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, выращенные методом HVPE на сапфире были обработаны высокоэнергетической водородной плазмой. После обработки на поверхности образовался проводящий слой, обусловленный появлением мелких доноров (атомарный водород и комплексы водород-кислород). Обработка порождает большое количество глубоких центров захвата носителей заряда, в том числе заметных на кривой спада фотоиндуцированного тока. После обработки проводимость образцов резко растёт, фотопроводимость растёт в меньшей степени, но релаксационные процессы ускоряются. Показано, что характерные времена нарастания и спада фотоиндуцированного тока в необработанных образцах составляют сотни секунд, при этом релаксационные кривые имеют вид мультиэкспоненциальных кривых и могут быть разложены на несколько составляющих при помощи метода анализа логарифмической производной сигнала. По результатам измерений сделан вывод о значительном влиянии градиента потенциала вблизи границы интерфейса на однородность распределения носителей под барьером Шоттки.

Ключевые слова: оксид галлия; обработка в водородной плазме; время релаксации фотоиндуцированного тока; спектроскопия глубоких центров; спектр фототока.

SLOW PHOTOCONDUCTIVITY RELAXATION OBSERVATION IN THE Ga_2O_3 FILMS AFTER HYDROGEN PLASMA TREATMENT

Ivan Schemerov, Alexander Polyakov, Anton Vasilyev, Anastasia Kochkova
National University of Science and Technology “MISIS”,
4 Leninsky Ave., 119049 Moscow, Russia, schemerov.iv@misis.ru

Unintentionally Sn-doped HVPE $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ films on the sapphire substrate after hydrogen plasma treatment were studied. Hydrogen plasma treatment produces the conductance layer on the film surface since H atoms and H-O complexes are shallow donors. Also, a lot of deep levels were found after treatment. Increasing of the deep traps leads to increasing of the external quantum efficiency in the high-wavelength part of spectra. It was shown that characteristic time of the photoinduced current are extremely high. Relaxation curve can be described as a sum of exponential decays with different characteristic times, including very long. These processes can be separated using logarithmic derivative of the photorelaxation signal on the time. It can be shown that potential fluctuation under the Schottky barrier leads to non-uniform current carrier distribution and, as a result, to stretching of the photoinduced current relaxation.

Keywords: gallium oxide; hydrogen plasma treatment; photoinduced current relaxation; deep level spectroscopy; photocurrent spectra.

Введение

Оксид галлия (Ga_2O_3) – один из перспективных материалов современной микроэлектроники. Это широкозонный полупроводник, ширина запрещённой зоны (E_g) для термодинамически стабильного β -полиморфа составляет 4.8 эВ, а для метастабильного α -полиморфа превышает 5 эВ. По зонной структуре он является почти прямозонным. За счёт большой ширины запрещённой зоны он может позво-

лить создавать солнечно-слепые детекторы ультрафиолетового излучения. Теоретически предсказаны огромные значения пробивных напряжений (до 8 МВ/см) [1-2]. Вместе с тем, данный материал обладает набором недостатков, которые существенно ограничивают его практическое применение. Во-первых, это практически полное отсутствие дырочной проводимости: все обнаруженные на данный момент акцепторы для Ga_2O_3 являются очень глу-

бокими. Кроме того, имеет место существенный самозахват дырок на глубокие состояния. Считается, что дырки образуют поляронные состояния, которые отличаются крайне низкой подвижностью. Во-вторых, материал обладает очень малой теплопроводностью, что приводит к необходимости выращивания плёнок на более теплопроводящих подложках. Наконец, в-третьих, скорость нарастания фотоиндуцированного тока и последующей его релаксации крайне мала. Так, типичные времена нарастания и спада фототока могут достигать десятков секунд, что существенно снижает эффективность работы устройств на базе данного материала как сенсора дальнего ультрафиолета.

Целью данной работы было исследование скорости нарастания и спада фототока в образцах α -Ga₂O₃ до и после обработки в водородной плазме.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись плёнки оксида галлия, легированные оловом. Плёнки α -Ga₂O₃ были изготовлены методом HVPE на сапфире (толщина подложки 600 мкм). Легирование оловом производилось в процессе роста плёнок путём добавления атомарного олова в рабочую камеру. Рост происходил при температуре 500°C, продолжительность выращивания легированного слоя составляла 10 минут, толщина плёнки 2.5 мкм. Проводимость полученной плёнки была незначительна (на уровне 10⁹ Ом на квадрат) но с большой фоточувствительностью.

Образцы были обработаны в водородной плазме для создания проводящего слоя. Толщина проводящего слоя составила 1.5 мкм, поверхностное сопротивление упало до 10³ Ом на квадрат.

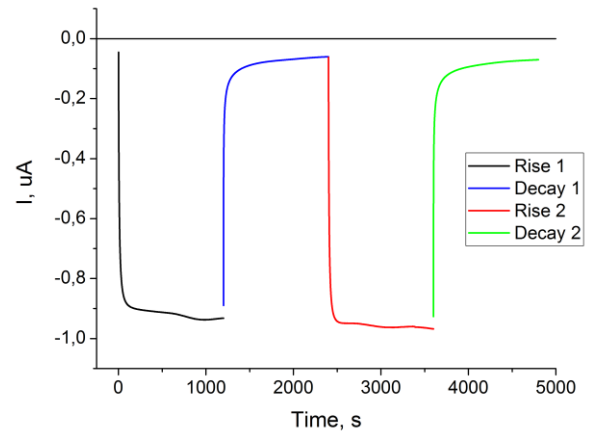
На поверхности образца были нанесены контакты: омический (Ni) и Шоттки (Ti/Au) при помощи электронного луча.

Зависимость тока от напряжения в темноте и при засветке исследовалась при помощи источника/измерителя Keysight B2902A (США). Для засветки использова-

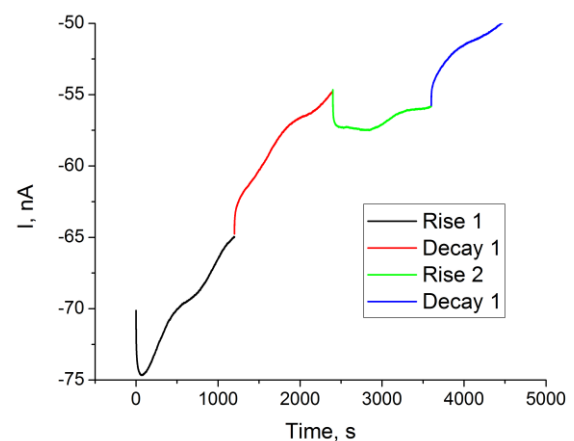
лись светодиоды с длиной волны 530 нм (световая мощность порядка 100 мВт/см) и 277 нм (10 мВт/см) фирмы Nichia (Япония). Процедура измерения релаксации фототока подробно описана в [2].

Результаты и их обсуждение

До обработки в плазме сопротивление образца было настолько велико, что классические емкостные методы спектроскопии глубоких уровней не позволили измерить концентрацию дефектов. Ёмкость структуры составляла порядка долей пФ, что недостаточно для измерений с высокой точностью. На рис. 1 приведены кривые релаксации фотоиндуцированного тока при засветке 277 нм (а) и 530 нм (б), напряжение -10 В, температура 400 К.



(а)



(б)

Рис. 1. Релаксационные кривые нарастания и спада фототока (приложенное напряжение -10 В): а – засветка 277 нм; б – засветка 530 нм

Из рис. 1 видно, что засветка светодиодов с длиной волны 277 нм (энергия излучения 4.5 эВ, сравнимо с E_g) значительно увеличивает концентрацию основных носителей заряда, а вместе с ней величину тока и ёмкость. Более длинноволновый, т.н. «примесный» свет (530 нм) увеличивает проводимость всего в десятки раз.

Фотоиндуцированный ток при засветке светодиодом 530 нм достаточно мал, чтобы на его фоне можно было заметить продолжительную релаксацию фототока после засветки ультрафиолетом. Можно оценить характерное время релаксации для этого процесса. Для этого можно проанализировать логарифмическую производную сигнала по времени [3]. Данная кривая для длины волны 530 нм приведена на рис. 2.

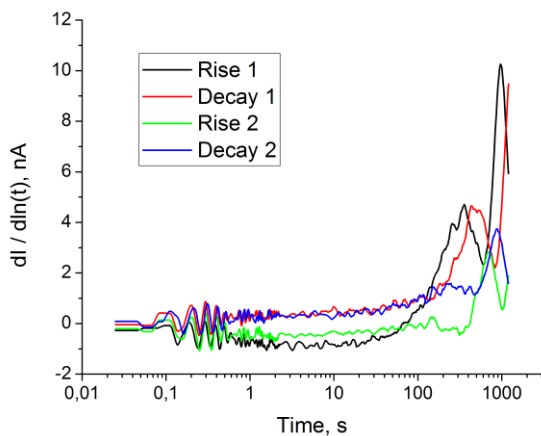


Рис. 2. Логарифмическая производная сигнала

Из рис. 2 видно, что засветка образца зелёным светом после ультрафиолетового насыщает образец основными носителями, которые удаляются из образца по медленному механизму (характерное время – несколько сотен секунд) и оставляют на кривой логарифмической производной пики, положение которых соответствует характерному времени данного механизма. Можно заметить, что от измерения к измерению пики сдвигаются в более медленную область. Характерное время релаксационного процесса постепенно замедляется. В литературе этот эффект но-

сит название «растянутые экспоненты» и характеризуется коэффициентом растянутости, другими словами, степенью p в выражении $\tau = t^{(1-p)}$, где τ – характерное время релаксации, t – время от начала релаксации. В данном случае величина p составляет 0.3. Это может говорить о влиянии неоднородности распределения концентрации дефектов у поверхности.

Обработка в водородной плазме позволила создать существенно легированный слой на поверхности образца и выровнять концентрацию, за счёт чего коэффициент растянутости увеличился до 1 (классическая экспонента).

Заключение

Степень растянутости экспоненты может говорить об однородности распределения центров захвата вблизи поверхности полупроводника. Для определения степени растянутости можно анализировать логарифмическую производную сигнала фотопроводимости от времени. Засветка зелёным светодиодом позволяет отделить процесс, связанный с релаксацией по собственному механизму и зафиксировать его постепенное замедление.

Работа выполнена при поддержке министерства образования и науки РФ, соглашение № 22-72-00010.

Библиографические ссылки

1. Pearton S.J., Yang J., Cary P. H. IV, Ren F., Kim J., Tadjer M. J. и др. A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices. *Applied Physics Review* 2018; (5): 011301.
2. Щемеров И.В., Поляков А.Я., Алмаев А.В., Николаев В.И., Кобелева С.П., Васильев А.А. Исследование аномально высокого времени релаксации фототока в диодах Шоттки на основе α-Ga₂O₃. *Известия ВУЗов. Материалы электронной техники* 2023; 26 (2): 20-28
3. Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Shchemerov I.V., Lee I.H., Jang T., Dorofeev A.A. Current relaxation analysis in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Nanotechnology and Microelectronics* 2017; 35 (1): 011207-(1-10).