

Экспериментальное определение времени жизни носителей заряда в GaAs, выращенном при низкой температуре

© А.А. Пастор, П.Ю. Сердобинцев*, В.В. Чалдышев[†]

Санкт-Петербургский государственный университет (физический факультет),
198504 Старый Петергоф, Санкт-Петербург, Россия

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

[†] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 ноября 2011 г. Принята к печати 21 ноября 2011 г.)

Изучена динамика релаксации неравновесных носителей заряда в эпитаксиальных пленках арсенида галлия, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низкой температуре. Условия выращивания эпитаксиального слоя обеспечивали содержание в нем избыточного мышьяка в количестве 1.2%. В таком материале время жизни носителей заряда составляет < 1 пс. Для исследования релаксации носителей заряда в фемтосекундном диапазоне разработана оригинальная схема измерения динамического изменения коэффициента преломления света, основанная на методике pump-probe. Определено время жизни неравновесных носителей заряда, оказавшееся равным (200 ± 35) фс.

Арсенид галлия, выращиваемый методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при низкой температуре (LT-GaAs), обладает уникальным набором электрофизических свойств, в том числе сверхкоротким временем жизни неравновесных носителей заряда, высоким удельным сопротивлением, высоким полем электрического пробоя, что делает такой материал чрезвычайно привлекательным для использования в разнообразных полупроводниковых приборах: транзисторах, интегральных микросхемах, терагерцовых передающих и приемных антеннах и др. [1–9]. Ключевую роль в формировании этих свойств играет избыток мышьяка, захватываемый в LT-GaAs в процессе низкотемпературной МЛЭ [2–6].

Поскольку свойства материала существенно зависят от условий его выращивания, экспериментальное определение важнейшего параметра — времени жизни носителей заряда — является чрезвычайно актуальным как с научной, так и с практической точек зрения. Для изучения динамики релаксации носителей заряда обычно используется методика pump-probe [7,10–15]. В этой методике с помощью импульса оптической накачки (pump) в материале создается концентрация неравновесных носителей заряда, достаточная для изменения показателя преломления, динамика изменения которого регистрируется с помощью зондирующего пробного импульса света (probe).

В данной работе мы разработали оригинальную схему измерений pump-probe и использовали ее для определения времени жизни носителей заряда в слоях LT-GaAs.

Объектами исследований служили эпитаксиальные слои LT-GaAs, выращенные при 150, 180 и 200 °С методом МЛЭ на подложках из полуизолирующего GaAs с ориентацией (001). Технология получения таких слоев описана в работе [4]. Толщина слоев составляла 1 мкм.

Для экспериментального изучения времени релаксации неравновесные свободные носители заряда в

LT-GaAs создавались излучением фемтосекундной лазерной установки „Пульсар-10“ на длине волны 800 нм. Экспериментальная схема измерения наведенных изменений показателя преломления твердотельных образцов выглядит следующим образом: два пучка (импульс накачки и зондирующий пробный импульс с интенсивностью, меньшей в 100 раз) сходятся на образце GaAs, пересекаясь под небольшим углом так, что их волновые поверхности встречаются на поверхности образца только на одной прямой, а в других местах запаздывает либо накачка, либо пробный импульс. Отражение пробного импульса регистрировалось вблизи угла Брюстера.

На рис. 1 изображена схема экспериментальной установки. Излучение лазера с длиной волны 800 нм, энергией в импульсе 1–5 мДж, частотой повторения импульсов 10 Гц и длительностью импульса 50 фс разделяется светоделителем BS; зеркала M1 и M2 образуют линию задержки DL, с помощью которой можно менять задержку между импульсами. Пучок накачки и пробный пучок пересекаются на поверхности образца. Отражение

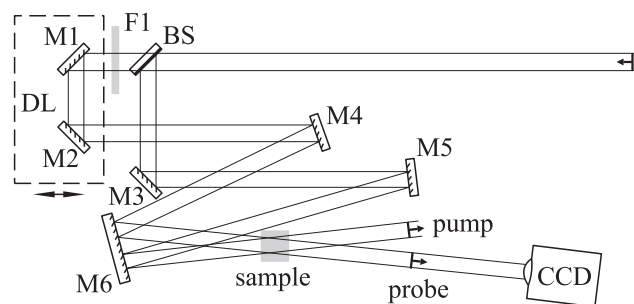


Рис. 1. Схема эксперимента: F1 — нейтральный светофильтр, ослабляющий в 100 раз пробный импульс; BS — светоделитель; (M1–M6) — зеркала; DL — линия задержки; CCD-камера фокусируется на поверхность образца.

[†] E-mail: chald.gvg@mail.ioffe.ru

пробного пучка регистрируется CCD-камерой, объектив которой сфокусирован на поверхность образца.

Угол падения импульса накачки и пробного импульса на поверхность образца был выбран равным углу Брюстера, так что коэффициент отражения p -поляризованных пучков света был близок к нулю для возбужденного импульсом накачки образца. Отражение возникало лишь за счет изучаемого эффекта наведенного коэффициента отражения при генерации свободных носителей. Такая конфигурация обеспечивает максимум относительного изменения интенсивности отраженного пробного излучения. На поверхности образца пространственно были разделены зоны, в которых импульс накачки опережал пробный импульс, и области, в которых импульс накачки запаздывает по отношению к пробному импульсу. Поскольку объектив CCD-камеры, регистрирующей отраженное излучение пробного импульса, был сфокусирован на поверхность образца, распределение интенсивности излучения по поверхности соответствовало различным задержкам пробного импульса по отношению к импульсу накачки.

В работе были проделаны несколько серий экспериментов. Был получен набор регистрограмм отраженного от образцов пробного пучка для различных временных задержек. С помощью вычитания двух регистрограмм, соответствующих разным задержкам между накачивающим и зондирующим импульсами, получались разностные изображения, позволяющие определить время релаксации наведенного коэффициента преломления.

Для образца, выращенного при 210°C , на рис. 2 приведено изображение, демонстрирующее результат вычитания двух регистрограмм, разделенных временным интервалом задержки пробного импульса в 667 фс. На изображении видна дифракционная картина, на фоне которой выделяется вертикальная полоса, соответствующая по горизонтальной оси длительности задержки 667 фс. На рис. 3 показано изображение того же образца, полученное при длительности задержки 1333 фс. На изображении видно соответствующее смещение левого края и увеличение ширины вертикальной полосы. Ось времени задержки на рис. 2 и 3 направлена справа налево.

Полученные регистрограммы позволяют определить время релаксации исследуемого эффекта наведенного отражения. Зависимость уровня засветки пикселей CCD-камеры (уровня серого) от положения пикселя, соответствующая одному из сечений изображения (рис. 2), приведена на рис. 4. По сути она характеризует зависимость коэффициента отражения от времени в относительных единицах. Время на рис. 4 увеличивается справа налево. Первый максимум интенсивности отражения, локализованный вблизи координаты, соответствующей 300-му пикселу CCD-камеры, соответствует совпадению по времени импульса накачки и пробного импульса в первой серии экспериментов. Последующий спад интенсивности отражения от 300-го до примерно 250-го пиксела, который аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, соответствует запаздыванию пробного импульса по отношению к импульсу накачки. Минимум отражения,

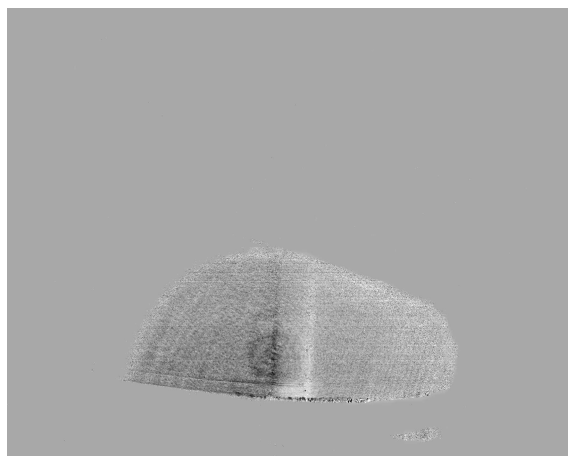


Рис. 2. Результат вычитания двух регистрограмм пробных импульсов, разделенных временным промежутком в 667 фс. Длина задерживающей линии 200 мкм. Образец LT-GaAs, температура выращивания 210°C .

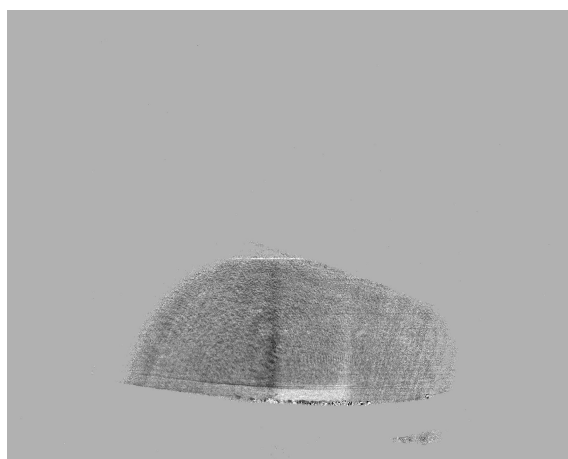


Рис. 3. Результат вычитания двух регистрограмм пробных импульсов, разделенных временным промежутком в 1333 фс. Образец LT-GaAs, температура выращивания 210°C .

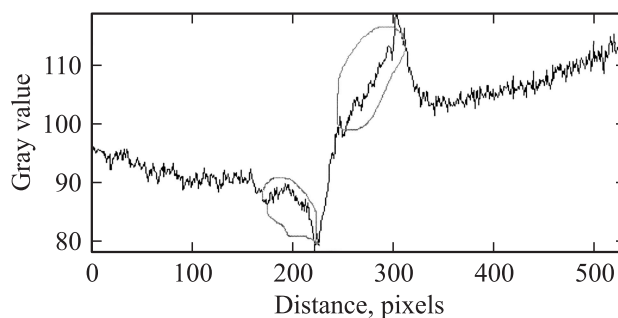


Рис. 4. Зависимость уровня засветки на регистрограмме от положения пикселя, показывающая зависимость коэффициента отражения от времени в относительных единицах. Длительность задержки 667 фс. Образец LT-GaAs, температура выращивания 210°C .

локализованный в районе 225-го пиксела, соответствует совпадению во времени импульсов накачки и пробного во второй серии экспериментов. Следовательно, расстояние между этими двумя экстремумами (примерно 75 пикселов CCD-камеры) соответствует задержке в 667 фс, вводимой между первой и второй сериями. Отсюда можно получить коэффициент, связывающий пространственную координату на поверхности образца, выраженную в пикселах, и время задержки. Сдвиг на один пиксел соответствует запаздыванию пробного импульса на 8.9 фс.

На рис. 4 выделены области релаксации коэффициента отражения. Аппроксимировав эти области экспонентой вида $y = y_0 + A \exp[(x - x_0)/\tau]$, можно определить характерное время τ , которое определяет время релаксации свободных носителей заряда в исследуемом образце.

Осуществив обработку экспериментальных данных, приведя их к среднему значению и посчитав погрешность, для образца, выращенного при 210°C, мы получили значение времени релаксации $\tau = (200 \pm 35)$ фс. Поскольку изменение оптических свойств материала было обусловлено созданными импульсом накачки неравновесными носителями заряда, измеренное время равно времени жизни носителей заряда. Полученная нами величина τ близка к рекордно малым временам жизни носителей, полученным ранее различными группами авторов [10–15] для эпитаксиальных слоев LT-GaAs.

Известно [6], что время жизни носителей заряда в LT-GaAs определяется процессами захвата на дефекты нестехиометрии — антиструктурные дефекты As_{Ga} и вакансии V_{Ga} , а после отжига еще и на нановключения полуметалла As. Ключевым фактором является концентрация избыточного мышьяка в материале. Поскольку избыточный мышьяк захватывается в процессе низкотемпературной МЛЭ преимущественно в форме антиструктурных дефектов As_{Ga} , концентрация нестехиометрического мышьяка может быть определена по изменению параметра решетки материала в соответствии с калибровкой [16] и по величине оптического поглощения на длине волны 1 мкм в соответствии с калибровкой [17]. По данным стационарных оптических измерений для образца, выращенного при 210°C, концентрация избыточного мышьяка составила $(0.98 \pm 0.02)\%$ (концентрация антиструктурных дефектов мышьяка $(1.06 \pm 0.02) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Регистрограммы для этого образца приведены на рис. 2, 3 и показывают время жизни неравновесных носителей заряда $\tau = (200 \pm 35)$ фс. При уменьшении температуры эпитаксии до 180 и 150°C концентрация избыточного мышьяка увеличивается до 1.2% [4]. В результате этого следует ожидать соответствующее уменьшение времени жизни носителей заряда. Наши измерения качественно подтвердили эти ожидания. Однако достоверно определить время жизни неравновесных носителей заряда в таких образцах не удалось, поскольку сверхбыстрая релаксация носителей давала малые, недостаточные для достоверной обработки величины наведенного изменения показателя преломления.

Таким образом, в работе опробована новая схема измерений и определено время жизни неравновесных носителей заряда в слоях LT-GaAs. Установлено, что в образце, выращенном при 210°C и содержащем 0.98% нестехиометрического мышьяка, время жизни носителей заряда составляет (200 ± 35) фс. Такой материал сохраняет высокое кристаллическое совершенство и может быть использован для создания оптических модуляторов, мультиплексоров, переключателей и устройств терагерцевой электроники.

Авторы благодарны В.В. Преображенскому, М.А. Пулято, Б.Р. Семягину за образцы LT-GaAs.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт № 16.513.11.3041) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-02-00973а).

Список литературы

- [1] F.W. Smith, A.R. Calawa, C.L. Chen, M.J. Mantra, L.J. Mahoney. *Electron. Dev. Lett.*, **9**, 77 (1988).
- [2] M. Kaminska, Z. Liliental-Weber, E.R. Weber, T. George, J.B. Kortright, F.W. Smith, B.Y. Tsaur, A.R. Calawa. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1831 (1989).
- [3] M.R. Melloch, K. Mahalingam, N. Otsuka, J.M. Woodall, A.C. Warren. *J. Cryst. Growth*, **111**, 39 (1991).
- [4] Н.А. Берт, А.И. Вейнгер, М.Д. Вилисова, С.И. Голошапов, И.В. Ивонин, С.В. Козырев, А.Е. Куницын, Л.Г. Лаврентьева, Д.И. Лубышев, В.В. Преображенский, Б.Р. Семягин, В.В. Третьяков, В.В. Чалдышев, М.П. Якубена. *ФТТ*, **35**, 2609 (1993).
- [5] J.K. Luo, H. Thomas, D.V. Morgan, D. Westwood, R.H. Williams. *Semicond. Sci. Technol.*, **9**, 2199 (1994).
- [6] M.R. Melloch, J.M. Woodall, E.S. Harmon, N. Otsuka, F.H. Pollak, D.D. Nolte, R.M. Feenstra, M.A. Lutz. *Annual. Rev. Mater. Sci.*, **25**, 547 (1995).
- [7] S. Gupta, J.F. Whitaker, G.A. Mourou. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 2464 (1992).
- [8] V.V. Chaldyshev. *Mater. Sci. Engin. B*, **88**, 195 (2002).
- [9] В.В. Чалдышев, М.А. Пулято, Б.Р. Семягин, В.В. Преображенский, О.П. Пчеляков, А.В. Хан, В.Г. Канаев, Л.С. Широкова, А.В. Голиков, В.А. Кагадей, Ю.В. Лиленко, Н.В. Карпович. *Электронная промышленность*, № 1–2, 154 (1999).
- [10] J.F. Roux, J.L. Coutaz, A. Krotkus. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2462 (1999).
- [11] P.A. Loukakos, C. Kalpouzos, I.E. Perakis, Z. Hatzopoulos, M. Sfendourakis, G. Kostantinidis, C. Fotakis. *J. Appl. Phys.*, **91**, 9863 (2002).
- [12] M. Haiml, U. Siegner, F. Morier-Genoud, U. Keller, M. Luysberg, P. Specht, E.R. Weber. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 1269 (1999).
- [13] A.J. Lochtefeld, M.R. Melloch, J.C.P. Chang, E.S. Harmon. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 1465 (1996).
- [14] U. Siegner, R. Fluck, G. Zhang, U. Keller. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2566 (1996).
- [15] P.W.E. Smith, S.D. Benjamin, H.S. Loka. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1156 (1997).

- [16] X. Liu, A. Prasad, J. Nishio, E.R. Weber, Z. Liliental-Weber, W. Walukievich. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 279 (1995).
[17] G.M. Martin. *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 747 (1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Experimental evaluation of the lifetime of the charge carriers in GaAs grown at low temperature

A.A. Pastor, P.Yu. Serdobintsev, V.V. Chaldyshev⁺*

St. Petersburg State University (Physical Department),
198504 St. Petersburg, Russia

* St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

⁺ Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Dynamics of the relaxation of the non-equilibrium charge carriers has been studied in GaAs epitaxial films grown by molecular-beam epitaxy at low temperature. The growth conditions of the epitaxial film provided the content of the excess arsenic of 1.2%. In such material the charge carrier lifetime is < 1 ps. In order to study the carrier relaxation in the femtosecond range we implemented an original scheme of measurements of the dynamic changes in the light refraction coefficient, which was based on the pump–probe technique. The charge carrier lifetime was evaluated to be (200 ± 35) fs.