

О природе затухающих колебаний тока при образовании статического акустоэлектрического домена в гетероструктурах n -InGaAs/GaAs с квантовыми ямами

© П.А. Белевский, М.Н. Винославский[¶], В.Н. Порошин, И.В. Строганова

Институт физики Национальной академии наук Украины,
03680 Киев, Украина

(Получена 20 сентября 2007 г. Принята к печати 17 октября 2007 г.)

Экспериментально показано, что отражение от границ образца акустического потока в условиях возникновения статического акустоэлектрического домена в гетероструктуре n -InGaAs/GaAs с квантовыми ямами в латеральном электрическом поле существенно влияет на длительность инкубационного времени образования домена, форму и амплитуду колебаний тока.

PACS: 72.50.+b, 73.50.Rb, 77.65.Dq, 73.63.Hs

1. Введение

Известно, что в пьезополупроводниках электроны, движущиеся в электрическом поле с дрейфовой скоростью, превышающей скорость звука, интенсивно излучают акустические фононы. Это приводит к усилению шумовых волн в узком диапазоне частот, распространяющихся в направлении дрейфа электронов. Эти волны создают периодическое пьезоэлектрическое поле, взаимодействие носителей с которым приводит к их эффективному торможению до скорости звука (захват носителей в пьезоямы). В результате происходит перераспределение электрического поля в кристалле и образование весьма узкой в пространстве области достаточно сильного электрического поля и высокой плотности фононов — акустоэлектрического домена (АЭД). Эти домены в зависимости от величины усиления либо локализуются вблизи анода, либо распространяются со скоростью звука от катода, где они обычно возникают, к аноду. Такое явление было обнаружено и исследовано как в объемных материалах CdS, GaAs, InSb, Te и др. [1–5], так и в полупроводниковых гетероструктурах GaAs/AlGaAs и GaAs/InGaAs с квантовыми ямами в латеральном электрическом поле [6–10].

Из-за торможения носителей пьезоэлектрическим полем образование доменов сопровождается падением полного тока в образце. В случае исчезновения доменов на аноде происходит восстановление тока. Вследствие этого для движущихся доменов имеют место незатухающие колебания тока, период которых складывается из времени зарождения (инкубации) домена, зависящего от величины приложенного электрического поля, и времени прохождения доменом образца.

В случае образования неподвижного прианодного домена после падения тока также наблюдались его колебания, которые являлись затухающими [3,6,8–10]. Было установлено, что период колебаний соответствует времени пролета вдоль образца поперечной звуковой

волны. Поэтому нами в работе [10] колебания тока связывались с отражением усиливающихся акустических волн от границ образца.

В данной работе изучаются изменения формы импульса тока в условиях образования акустоэлектрического домена, вызываемые отраженными звуковыми волнами, с целью подтверждения такой природы колебаний. Исследования проведены в гетероструктурах GaAs/InGaAs n -типа с двойными квантовыми ямами. В таких структурах нами ранее [10] наблюдалось возникновение статических прианодных доменов и затухающие колебания тока в латеральном электрическом поле, направленном вдоль оси [110] InGaAs, при температурах 4.2 и 77 К и были исследованы зависимость времени инкубации домена от величины поля и температуры, частоты колебаний тока от длины образца и вида легирования (селективное или однородное).

2. Образцы и методика измерений

Гетероструктуры были выращены методом газотранспортной эпитаксии на подложках полуизолирующего GaAs (001). Они содержали 20 пар квантовых ям (слои InGaAs) шириной 200 и 100 Å, разделенных барьером GaAs толщиной 50 Å и разнесенных друг от друга на 780 Å. Структуры первого типа были легированы Si селективно в центр узкой квантовой ямы ($N_d \approx 1.1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ на период), структуры второго типа были однородно легированы Si ($N_d \approx 2.7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$).

Из структур выкальвались (по направлению [110]) образцы шириной 3 мм и длиной 10 мм. На их поверхность наносились и вжигались полосковые омические контакты из сплава германия с золотом. Один из контактов находился возле торца образца, а второй — в его средней части (рис. 1, *a*). Расстояние между контактами было равно 3 мм.

К контактам прикладывалось электрическое напряжение в виде двойных прямоугольных импульсов (рис. 1, *b*) с временем нарастания переднего фронта 100 нс. Они имели одинаковую амплитуду (до 1000 В), а временная

[¶] E-mail: mvinos@iop.kiev.ua

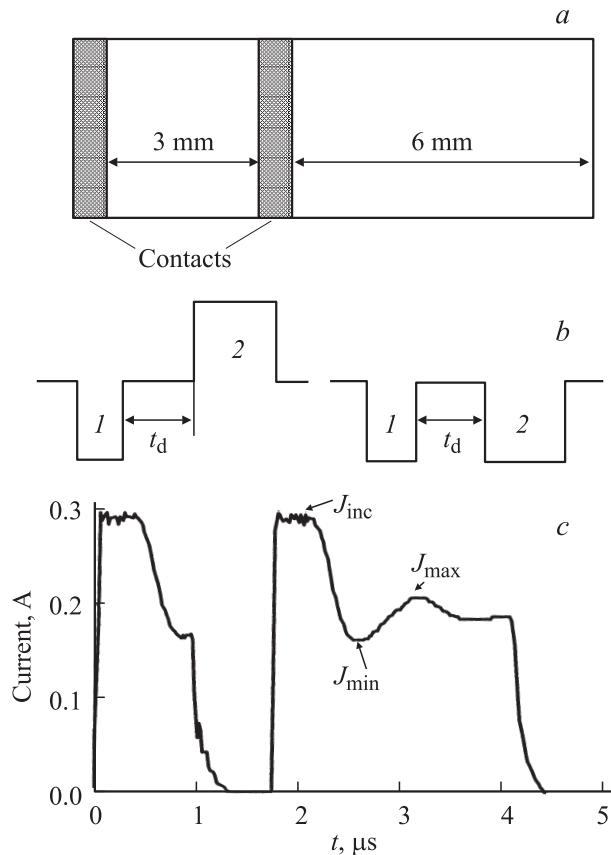


Рис. 1. *a* — исследуемый образец, *b* — пары (1, 2) импульсов напряжения разной или одинаковой полярности, *c* — регистрируемые импульсы тока в случае импульсов напряжения одинаковой полярности.

задержка одного относительно другого t_d могла изменяться от 0.1 до 10 мкс. Величина поля была достаточной для возникновения акустоэлектрического домена. При этом полярность первого импульса напряжения U_1 была такова, что анодом являлся электрический контакт, расположенный в средней части образца, а его длительность была равна приблизительно 1 мкс, что несколько больше времени инкубации домена. К концу этого импульса происходило формирование домена, и он достигал анодного контакта [10], что приводило к уменьшению тока до минимального значения J_{min} (рис. 1, *c*). Второй импульс напряжения U_2 имел длительность 3 мкс, а его полярность совпадала или была противоположной полярности первого импульса. Изменялись изменения временной зависимости тока для второго импульса напряжения, вызываемые приходом к аноду отраженного от торцов образца акустического волнового пакета, связанного с образованием АЭД от первого импульса напряжения.

В селективно и однородно легированных гетероструктурах величина электрического поля, при котором возникали акустоэлектрические домены E_d , была несколько разной, в соответствии с нашими исследованиями [10]. Это связано с различием в подвижности носителей. Энергетический спектр носителей в исследованных

структурах такой, что при температурах эксперимента они находятся в основном в широкой квантовой яме. При латеральном транспорте в этой яме носители рассеиваются только на фонах в структурах первого типа и на фонах и примесях в структурах второго типа. Отметим, что из-за разогрева в электрическом поле некоторая часть носителей переходит в узкую квантовую яму (пространственный перенос [11]). При этом в случае селективного легирования их подвижность уменьшается вследствие дополнительного примесного рассеяния. Для исследованных структур это уменьшение составляет всего 2 раза, как показывают наши расчеты. Поэтому уменьшение тока, связанное с пространственным переходом носителей между квантовыми ямами, мало, и оно не является причиной возникновения доменов.

3. Результаты и их обсуждение

При небольшой временной задержке второго импульса напряжения относительно первого ($t_d = 0.8$ мкс) акустический пакет, порожденный акустоэлектрическим доменом в первом импульсе, еще не успевает после отражения от свободного конца прийти в область между контактами ко времени действия второго импульса. В этом случае второй импульс тока в образце имеет характерную для возникновения АЭД форму: его амплитуда остается постоянной J_{inc} в течение времени инкубации домена, после чего наблюдается ее уменьшение до J_{min} и последующие периодические затухающие во времени колебания (рис. 1, *c*). Вольт-амперная характеристика

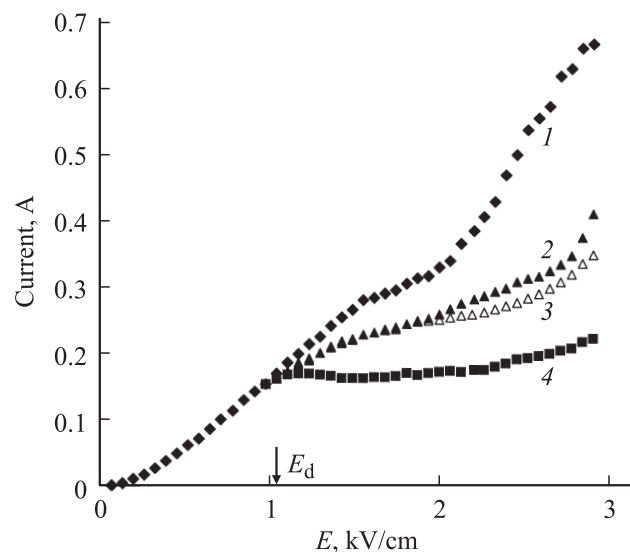


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики селективно легированной структуры в разные моменты импульса тока, соответствующие: 1 — времени инкубации. Участок пониженного наклона при $E = 1.5\text{--}2$ кВ/см связан с пространственным переносом электронов между квантовыми ямами; 2, 3 — первому максимуму колебаний (2 — анодный контакт находится возле торца образца, 3 — в средней его части); 4 — минимуму колебаний.

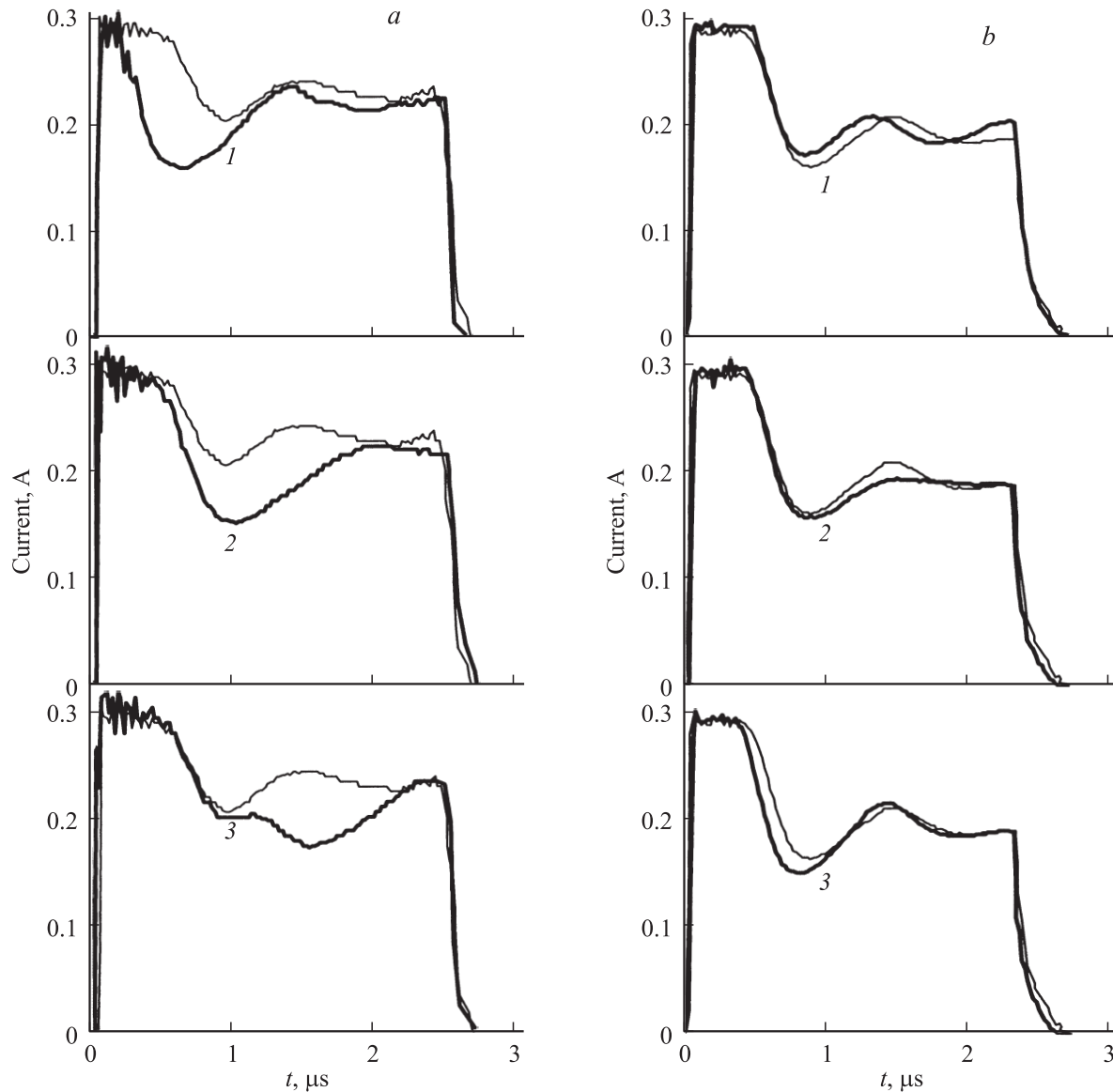


Рис. 3. Форма импульса тока (толстая линия) для второго импульса напряжения разной (*a*) и одинаковой (*b*) полярности (по отношению к первому импульсу) при различных временах задержки t_d , мкс, на рис. *a*: 1 — 3, 2 — 2.5, 3 — 2; на рис. *b*: 1 — 3, 2 — 3.8, 3 — 4.3. Тонкой линией показана форма импульса при $t_d = 0.8$ мкс.

(ВАХ), построенная для значений импульса тока J_{inc} , монотонно нарастает, а для минимума колебаний J_{min} — имеет слабую N -образность. При этом кривые для обеих полярностей второго импульса напряжения совпадают (рис. 2, кривые 1 и 4). В селективно легированных структурах на ВАХ для J_{inc} в полях $E = 1.5\text{--}2$ кВ/см (рис. 2, кривая 1) наблюдается участок пониженного наклона, который связан с пространственным переносом „горячих“ электронов из широкой квантовой ямы (КЯ) в узкую δ -легированную КЯ. Время инкубации домена в таких структурах оказывается большим, чем в однородно легированных структурах [10].

В то же время амплитуда тока для первого максимума колебаний J_{max} является разной для разных полярностей напряжения $U_2 > U_d$: она больше в том случае, когда

анодом является электрический контакт, расположенный вблизи торца образца (рис. 2, кривые 2, 3). Это связано, на наш взгляд, с отражением акустического потока и обусловлено изменением величины пьезоэлектрического поля (глубины пьезоям) при приходе отраженного потока в область домена. Это отражение происходит сильнее от торца образца (или находящегося возле него контакта) по сравнению с отражением от контакта в его средней части.

При увеличении времени задержки между импульсами напряжения t_d наблюдаются изменения формы импульса тока, которые связаны с влиянием отраженного от свободного торца образца акустического пакета, создаваемого первым импульсом напряжения. Остановимся сначала на случае, когда полярность второго импульса

напряжения противоположна полярности первого импульса. В зависимости от времени задержки $t_d > t_c$ (t_c — время двойного прохождения акустического пакета от первого импульса между средним контактом и торцом образца) наблюдаются изменения в различных частях второго токового импульса. При $t_d \approx 3$ мкс наблюдается сильное уменьшение длительности J_{inc} (уменьшается время инкубации домена, см. рис. 3, а, кривая 1). При таком же или близком значении t_d имеет место уменьшение амплитуды тока в минимуме (рис. 3, а, кривые 1 и 2), а при $t_d \approx 2.0$ мкс — в максимуме его колебаний вплоть до его полного исчезновения (рис. 3, а, кривая 3).

Иная картина наблюдается, если полярность второго импульса напряжения такая же, как первого импульса. В этом случае при времени задержки $t_d = 3.0–3.5$ мкс амплитуда тока в минимуме его колебаний не уменьшается, а увеличивается (рис. 3, б, кривая 1).

Различие во влиянии отраженного акустического потока на временную зависимость тока при образовании домена для рассмотренных случаев связано с тем, что для импульсов напряжения разной полярности поток распространяется вдоль направления дрейфа электронов во втором импульсе тока, а для импульсов одинаковой полярности — против него. Поэтому он усиливает или ослабляет акустический поток, создаваемый этим дрейфом, и, следовательно, величину пьезоэлектрического поля (глубину пьезоям). Это приводит к соответствующему изменению величины тока в структуре и изменению времени инкубации домена. Правильность такого объяснения подтверждается характером полученных данных при больших временах задержки t_d , когда за счет вторичного отражения от торца образца с катодным контактом направление распространения этого потока изменяется на противоположное и становится совпадающим с направлением дрейфа носителей (в случае импульсов одинаковой полярности). В этом случае вместо наблюдаемого ранее увеличения амплитуды тока в минимуме его колебаний имеет место его уменьшение (рис. 3, б, кривая 3).

4. Заключение

Таким образом показано, что отражение акустического потока от границ образца либо от легированной области контакта существенно влияет на величину и распределение акустического поля в образце и в значительной мере определяет временную зависимость полного тока в условиях возникновения акустоэлектрического домена — длительность инкубационного времени, вид и амплитуду колебаний тока после характерного его уменьшения.

Работа поддержана программой Национальной академии наук Украины „Физические и астрофизические исследования фундаментальных проблем строения и свойств материи на макроскопическом и микроскопическом уровнях“ (проект ВЦ-138).

Авторы выражают признательность О.Г. Сарбею (Институт физики Национальной академии наук Украины, Киев) за плодотворное обсуждение работы и Б.Н. Звонкову (Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета, Нижний Новгород, Россия) за изготовление гетероструктур.

Список литературы

- [1] P.K. Tien. Phys. Rev., **171** (3), 970 (1968).
- [2] В.И. Пустовойт. УФН, **77**, 257 (1969).
- [3] R. Bray. IBM J. Res. Develop., September, **487** (1969).
- [4] В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, А.Г. Миронов. *Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках* (М., Наука, 1972).
- [5] В.М. Рысаков. ФТТ, **39** (5), 835 (1997).
- [6] N. Balkan, В.К. Ridley, J.S. Roberts. Superlat Microstruct., **5** (4), 539 (1989).
- [7] А.В. Антонов, А.В. Гавриленко, В.И. Гавриленко, Е.В. Демидов, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова, М.Н. Винославский, П.А. Белевский, А.В. Кравченко. Изв. АН. Сер. физ., **68** (1), 68 (2004).
- [8] А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, Е.В. Демидов, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова. ФТП **39** (1), 53 (2005).
- [9] V.Ya. Aleshkin, A.A. Anlronov, A.V. Antonov, E.V. Demidov, A.A. Dubinov, V.I. Gavrilenko, D.G. Revin, B.N. Zvonkov, N.B. Zvonkov, E.V. Uskova, L.E. Vorobjev, D.A. Firsov, S.N. Danilov, I.E. Titkov, V.A. Shalygin, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov. Proc. SPIE, **4318**, 192 (2001).
- [10] V.V. Vainberg, Yu.N. Gudenko, P.A. Belevskii, M.N. Vinoslavskii, V.N. Poroshin, V.M. Vasetskii. Nanosystems, nanomaterials, nanotechnology, **4** (1), 63 (2006).
- [11] Z.S. Gribnikov, K. Hess, G.A. Kozinovskiy. J. Appl. Phys., **77** (4), 1337 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

About the nature of damped current oscillations under the static acoustoelectric domain formation in *n*-InGaAs/GaAs heterostructure with quantum wells

P.A. Belevskii, M.N. Vinoslavskii, V.N. Poroshin, I.V. Stroganova

Institute of Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03680 Kyiv, Ukraine

Abstract It has been experimentally shown, that the acoustic stream reflection from borders of the sample in conditions of the static acoustoelectric domain formation in *n*-InGaAs/GaAs heterostructure with quantum wells in a lateral electric field essentially influences an incubation time duration, a shape and amplitude of current oscillations.