

## Эксклюзия носителей заряда в InAs

© С.С. Болгов, В.К. Малютенко, А.П. Савченко

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,  
252650 Киев, Украина

(Получена 11 июня 1996 г. Принята к печати 1 июля 1996 г.)

Впервые сообщается о наблюдении эффекта контактной эксклюзии в  $p^+ - p - p^+$ -структурах на базе InAs при высоких температурах. Для идентификации процесса неравновесного истощения базы, свидетельствующего об эксклюзии свободных носителей заряда, исследовались вольт-амперные характеристики, кинетика установления тока и отрицательная люминесценция в спектральной области межзонных переходов. Обсуждается практический аспект этого явления.

В настоящее время имеется большое количество работ, в которых исследованы закономерности явления эксклюзии (биполярного истощения полупроводника с собственной проводимостью, снабженного антизапорными контактами) и предложены пути его практического использования. Исследования проводились в основном в хорошо очищенных либо компенсированных широкозонных материалах Ge и Si. Однако в связи с появлением ряда новых практических задач, которые можно решать с помощью контактной эксклюзии, в частности, возможности создания эффективных фотоприемников [1] и источников инфракрасного (ИК) диапазона [2], исследование этого явления в материалах, традиционно используемых в ИК технике, представляет особый интерес [3]. В [4] нами была показана возможность реализации эксклюзии в гетероструктурах  $Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe$ . В настоящей работе впервые сообщается о наблюдении эксклюзии в  $p^+ - p - p^+$ -структурах на базе InAs при высоких температурах.

Исследования проводились при  $T = 300 - 400$  К на образцах  $p^+ - p - p^+$  из InAs, изготовленных в виде прямоугольных пластин размерами  $3 \times 1.5 \times 0.4$  мм, с концентрацией дырок в базе  $N_a - N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , превышающей концентрацию собственных носителей заряда  $n_i = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при комнатной температуре. Антизапорные контакты создавались путем диффузии Zn в насыщенных парах As. Для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации образцы подвергались травлению в смеси  $5\text{HNO}_3 : 1\text{HF} : 1\text{CH}_3\text{COOH}$ . Для идентификации процесса неравновесного истощения базы, свидетельствующего об эксклюзии электронно-дырочных пар, исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ), кинетика установления тока и отрицательная люминесценция в области межзонных переходов материала ( $\lambda \leq 3.8$  мкм).

Электрическое поле во избежание джоулева разогрева прикладывалось к  $p^+$ -контактам в виде прямоугольных импульсов длительностью 10 мкс (режим постоянного напряжения). У поверхности кристалла вблизи одного из антизапорных контактов устанавливали диафрагму шириной 1.0 мм, через которую наблюдалось неравновесное излучение с помощью фотоприемника из PbSe. Импульсы тока и напряжения регистрировались стробо-

скопическим осциллографом, а ВАХ и полевые зависимости отрицательной люминесценции записывались на самописце.

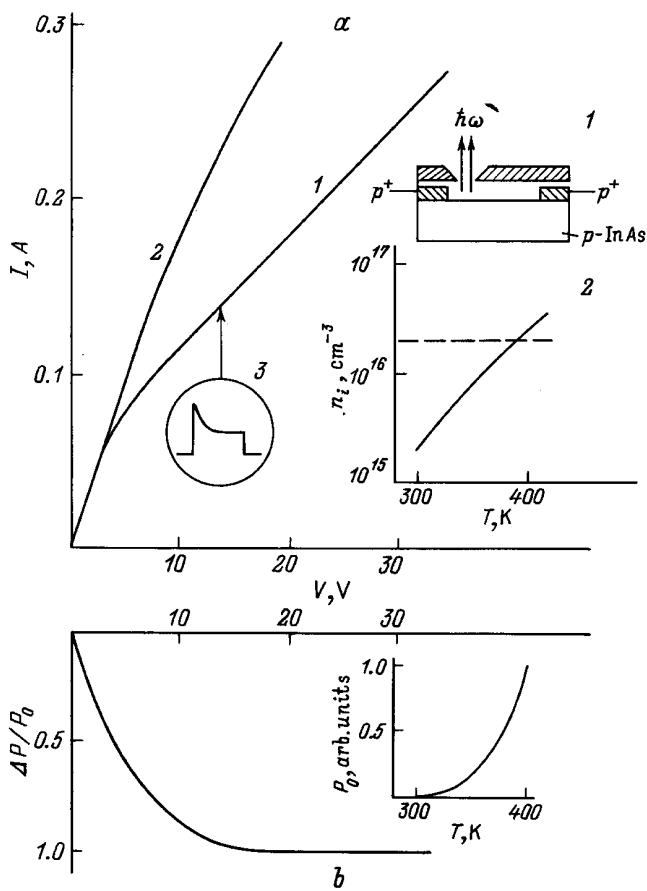
При  $T = 300$  К, как и ожидалось, эффект эксклюзии в диапазоне исследованных напряжений  $V \leq 30$  В отсутствовал: ВАХ была омической, импульсы тока — прямоугольными, сигнал отрицательной люминесценции не наблюдался (область монополярной проводимости, эффект биполярного истощения незначителен).

С увеличением температуры вследствие возрастания концентрации собственных носителей заряда  $n_i$  (область биполярной проводимости, см. вставку 2 на рисунке) наблюдались типичные признаки эксклюзии. На ВАХ возникла характерная для эксклюзии область сублинейности  $V \sim I^{1/2}$ , импульс тока при прямоугольном импульсе напряжения имел вид спадающей кривой с последующим выходом на насыщение (см. рисунок, а). Об уменьшении концентрации носителей заряда в базе свидетельствует также полевая зависимость сигнала отрицательной межзонной люминесценции  $\Delta P$ , возникающей, как известно, в условиях, когда концентрации электронов  $n$  и дырок  $p$  становятся ниже равновесных значений  $np < n_i^2$  [2] (см. рисунок, б). Амплитуда сигнала возрастает с ростом напряжения и далее остается неизменной, свидетельствуя о полном истощении базы.<sup>1</sup> С ростом  $T$  мощность сигнала отрицательной люминесценции  $\Delta P$  в области насыщения увеличивается.

Увеличение скорости поверхностной рекомбинации в базе структуры (полировка поверхности), как следует ожидать [6], подавляет эффект эксклюзии вследствие уменьшения эффективного времени жизни носителей заряда. В результате сигнал отрицательной люминесценции уменьшается, ВАХ приближается к омической (см. кривую 2 на рисунке, а), импульс тока становится прямоугольным.

Считая существование эффекта эксклюзии в InAs доказанным, приведем в заключение несколько практических рекомендаций. Из ВАХ легко оценить время жизни электронно-дырочных пар в базе структуры. Область сублинейности ВАХ характеризует процесс истощения базы вследствие выноса носителей к одному из  $p^+$ -контактов.

<sup>1</sup> Детальные сведения об особенностях отрицательной люминесценции в условиях контактной эксклюзии носителей заряда см. в [5].



*a* — Вольт-амперные характеристики структур  $p^+ - p - p^+ - \text{InAs}$  при  $T = 360 \text{ K}$ : 1 — травленная поверхность образца, 2 — шлифованная поверхность образца. На вставке 1 — схема эксперимента, на вставке 2 — температурная зависимость  $n_i$  в InAs, штриховая кривая —  $N_a - N_d$ , на вставке 3 — осциллограмма импульса тока. *b* — Полевая зависимость отрицательной люминесценции в InAs при эксклюзии при  $T = 360 \text{ K}$ . На вставке — температурная зависимость максимального сигнала отрицательной люминесценции InAs.

Режим полного истощения наступает при напряжении, когда область сублинейности сменяется вторым омическим участком на ВАХ (в эксперименте  $V = 10 \text{ В}$ ) и растянутая диффузионная длина  $L_d = \mu_n E \tau$  сравнивается с расстоянием между контактами  $d$ . Поскольку электрическое поле в этом случае практически однородно в базе структуры (слоем аккумуляции вблизи одного из  $p^+$ -контактов, протяженностью порядка диффузионной длины носителей, пренебрегаем), из выражения для  $L_d$  легко оценить время жизни электронно-дырочных пар  $\tau$ . Полагая  $\mu_n = 27000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , при  $V = 10 \text{ В}$  получаем  $\tau = 3.3 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ , что соответствует диффузионной длине носителей  $L = \sqrt{D\tau} = 28 \text{ мкм}$  ( $T = 360 \text{ K}$ ).

Практический интерес может представлять также использование  $p^+$ -структур из InAs в качестве быстродействующих источников ИК излучения, работающих при высоких температурах. По нашим оценкам, мощность

максимального сигнала отрицательной люминесценции, равного мощности равновесного излучения  $P_0$  материала в спектральном диапазоне межзонных переходов  $\lambda \leq \hbar c/E_g \leq 3.8 \text{ мкм}$ , при высоких температурах достаточно велика для практического использования. Так,  $\Delta P = -P_0 = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2$  при  $T = 400 \text{ K}$  (температурная зависимость  $P_0$  представлена на вставке к рисунку, *b*).

### Список литературы

- [1] T. Ashley, C.T. Elliott, A.M. White. SPIE Proc., **588**, 62 (1986).
- [2] С.С. Болгов, В.К. Малютенко, В.И. Пипа. Письма ЖТФ, **5**, 1444 (1979).
- [3] V.K. Malyutenko. Semicond. Sci. Technol., **8**, 390 (1993).
- [4] С.С. Болгов, В.К. Малютенко, В.И. Пипа, А.П. Савченко. Письма ЖТФ, **15**, 49 (1989).
- [5] В.К. Малютенко, А.Г. Коллюх, А.М. Рыбак. ЖПС, **47**, 299 (1987).
- [6] С.А. Витусевич, Ю.М. Малозовский, В.К. Малютенко. ФТП, **20**, 1841 (1986).

Редактор В.В. Чалдышев

### Exclusion of current carriers in InAs

S.S. Bolgov, V.K. Malyutenko, A.P. Savchenko

Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences,  
252650 Kiev, the Ukraine

**Abstract** The paper reports for the first time about the contact exclusion in the  $p^+ - p - p^+$ -structures based on InAs at high temperatures. In order to identify the process of non-equilibrium base depletion indicative of electron-hole pair exclusion, the  $I - V$ -characteristics, current maintaining kinetics and negative luminescence in the region of interband transitions have been studied. Applicability points of the phenomenon under consideration are being discussed.